Écritures gauloises : 800 stèles déchiffrées p. 82

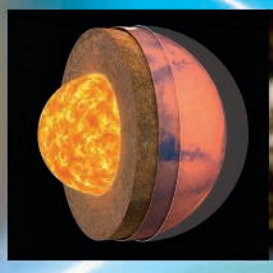
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© OZGRAV-CENTRE FOR PALAEOGENETICS
UNIVERSITY OF MELBOURNE | PGP AUBERT

Numéro spécial

Les 10 DÉCOUVERTES DE L'ANNÉE 2021

• Astronomie • Intelligence artificielle • Paléontologie
• Neurosciences • Génétique • Greffe... p. 28



L 13418 - 899 - F: 5,30 € - RD

JANVIER 2022 - N° 899 - ALLEMAGNE 7.40 / AUTRICHE 6,50 / ITALIE 5.70 / LUXEMBOURG 5.70 / GRÈCE 5.70 / BELGIQUE 5.70 / ESPAGNE 5.70 / DOM 5.90 / DOM-AVION 7.90 / ANDORRE 5,40 / PORTUGAL 5.70 / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60 / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 899 - JANVIER 2022 - LES 10 DÉCOUVERTES DE L'ANNÉE 2021

EQV 100% ÉLECTRIQUE.

D'ici le 31 décembre, jusqu'à 2 110 € TTC** d'aide pour l'achat et l'installation d'une borne.

À partir de

829 € TTC*/mois*
1er loyer de 4 500 € TTC*(1)

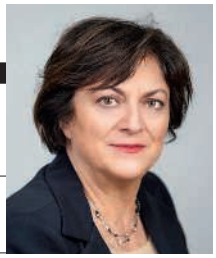
Location Longue Durée 48 mois - 80 000 km - Complémentaire financière inclus.

Pour en savoir plus sur l'EQV, flashez ce code ou téléphonez au 01 55 94 20 76.(2)

MERCEDES-EQ

(1) Location Longue Durée : 48 mois - 80 000 km EQV 300 LG Avantgarde avec Banquette 3 places confort pour la 1ère rangée, siège extérieur rabattable, Banquette 3 places confort pour la 2ème rangée, siège extérieur rabattable et peinture blanc arctique, 1er loyer de 4 500 € TTC* et 47 loyers mensuels de 829 € TTC*. **Consommations WLTP (combinées mixtes au 01/10/21) : 28,7 kWh/100 km - CO_2 de 0 g/km. Autonomie électrique : 348 km**. Offre au prix tarif remisé du 01/10/21, non cumulable, réservée aux particuliers, pour tout EQV de la gamme utilitaire Mercedes-Benz, valable dans la limite des stocks disponibles pour toute commande du 01/11/21 au 31/12/21 et livraison avant le 31/05/22 chez les distributeurs participants, sous réserve d'acceptation du dossier par Mercedes-Benz Financial Services SA, 7 avenue Nicéphore Niépce, 78180 Montigny, RCS Versailles 304 974 249, N° ORIAS 07009177, N° ICS FR77ZZZ149071. Mercedes-Benz France SAS au capital de 75 516 000 euros, 7 avenue Nicéphore Niépce, 78180 Montigny RCS Versailles 622 044 287. ✇ Mercedes-Benz : marques déposées de Daimler AG. Conditions sur www.mercedes-benz.fr. * TVA au taux en vigueur en sus, incluant l'assurance Complémentaire Financière. **Votre remise exceptionnelle figure sur le bon de commande et sur la facture du véhicule remise par votre Distributeur participant, sous réserve d'éligibilité et de fourniture par le client des justificatifs correspondants. Veuillez-vous rapprocher de ce dernier pour en connaître les modalités de versement. (2) Prix d'un appel local.

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

French paradox

Le coup a été rude lors de l'annonce du prix Nobel d'Emmanuelle Charpentier pour sa découverte révolutionnaire de CRISPR-Cas9. Quand le petit monde scientifique français a été forcé de constater, en 2020, que la biologiste avait fondé son propre institut de recherche fondamentale sur les pathogènes, non en France mais au Max-Planck à Berlin (Allemagne). Le grand public, lui, voyait déjà sa crainte d'un déclin hexagonal alimentée par l'affaire de l'ARN messager. Mise en évidence à l'Institut Pasteur regorgeant de Nobel au début des années 1960, voilà que la molécule surgissait en fanfare dans des vaccins contre le Covid-19 inventés en Allemagne et aux États-Unis. Et non « made in France ».

Recherche fondamentale. Nos meilleurs cerveaux seraient-ils condamnés à l'exil et leurs idées à une valorisation financière à l'étranger ? S'il est bénéfique pour tout(e) jeune chercheur(se) de peaufiner sa formation dans un laboratoire américain, allemand, japonais, la question se pose de son retour en France. De quelle manne va-t-il/elle bénéficier ultérieurement pour mener sa barque scientifique ?

Moindre attractivité française. Surprise, un soir de novembre dernier à l'Institut de France. En vidéo depuis Berlin, Emmanuelle Charpentier annonçait avoir accepté d'être la marraine d'un nouveau prix substantiel, 2 millions d'euros par personne pour cinq ans. Avec pour objectif d'aider chaque année sept excellent(e)s scientifiques en milieu de carrière et… travaillant en France. Ce dont elle aurait aimé jadis bénéficier. L'aide émanera du privé, de la fondation Bettencourt-Schueller, dont la présidente Françoise Bettencourt Meyers dit tout de go regretter « *la diminution du rayonnement de la recherche française et de son attractivité dans un monde où les avancées scientifiques sont des enjeux fondamentaux pour notre humanité* ».

Oscar des sciences. Sévère critique. On peut maintenant se demander si elle poussera à desserrer les cordons de la bourse publique pour la recherche fondamentale. Hors de nos frontières, les cerveaux français ne cessent en effet d'être promus. Ainsi, le Breakthrough prize, « Oscar des sciences » californien, 3 millions de dollars, alloué en 2021 à la biologiste exilée Catherine Dulac, sera en 2022 partagé par Pascal Mayer avec deux Britanniques pour sa contribution à la lecture rapide des génomes. Avancée formidable en temps de coronavirus galopant. Le biophysicien a eu droit à un *tweet* de l'Élysée.

Et la liste s'allonge. L'éminent spécialiste de la vision José-Alain Sahel a été récipiendaire en novembre à Berlin du Breakthrough prize of the Year de la Fondation Falling Walls ; le physicien Thibault Damour, primé en octobre à Rome par la Fondation Balzan ; l'historienne des sciences Bernadette Bensaude-Vincent dotée aux États-Unis de la George Sarton Medal, plus prestigieuse récompense de l'History of Science Society, cinquante-huit ans après Georges Canguilhem et trente après Mirko Grmek… Ce « french paradox » est à déminer, et vite. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Tempêtes, canicules. L'ère des extrêmes »
(*Sciences et Avenir – La Recherche* n° 897, novembre 2021)

L'édito et le dossier de votre numéro de novembre sont consacrés aux changements climatiques et aux conséquences qui en résulteraient. L'origine anthropique de ces variations est établie mais il n'est fait aucune allusion à une autre cause potentielle liée aux variations de mouvements de la Terre par rapport au Soleil. Il est admis que ces mouvements, décrits par l'astronome serbe Milutin Milankovitch (1879-1958), ont eu une action directe sur les variations climatiques à long terme. Pourquoi les analyses du Giec ne mentionnent-elles jamais cette autre cause potentielle ? **Alain Bouchet**

S. et A. : L'explication tient dans la rapidité du changement climatique induit par le CO_2. Les cycles de Milankovitch se déroulent sur un pas de temps de 100 000 ans environ. Aujourd'hui, nous avons une augmentation des températures de 1,1 °C qui s'opère en moins de 200 ans. Ce qu'étudient les climatologues, c'est un événement brutal et rapide qui s'écarte complètement des cycles naturels.

Réduire l'effet des nuages

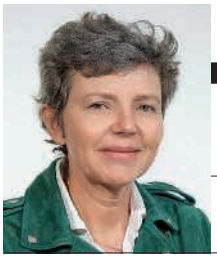
Pour lutter contre le réchauffement climatique, ne serait-il pas beaucoup plus productif de s'attaquer aux nuages, magnifique couvercle qui empêche la terre de radier vers l'espace ? En cette fin d'automne, par ciel dégagé, on a 3 °C le matin, s'il est couvert, on a 12 °C ! Y a-t-il des recherches pour réduire l'effet des nuages ? **F. Aoustin**

S. et A. : Selon le dernier rapport du Giec, l'humain a déjà — involontairement — favorisé la formation des nuages en rejetant ses propres aérosols issus de son activité à côté de ceux, naturels, issus de l'érosion éolienne, du sel, de la végétation. Leur formation est cependant trop erratique pour que l'homme puisse la contrôler. Les techniques de formation de la pluie par ensemencement de particules existent mais ne peuvent ainsi concerner que des régions très limitées de la planète.

Que d'eau !

La vapeur d'eau est de loin le gaz à effet de serre le plus puissant. Or le rôle de la vapeur d'eau n'est pas pris en compte dans des rapports comme celui du Giec ! **Alain Toureille**

S. et A. : La vapeur d'eau est bien le principal gaz à effet de serre. Mais sa teneur est constante. Les teneurs en CO_2, elles, sont en constante augmentation et sont passées de 280 parties par million (ppm) en 1850 à 415 ppm aujourd'hui. C'est la rapidité de cet accroissement qui est à l'origine de la hausse des températures, ainsi que l'avait déjà décrit le chimiste suédois Svante Arrhenius à la fin du XIXe siècle.



BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Carole Chatelain
Directrice de la rédaction

Découvertes prometteuses

Levons les yeux vers la Lune. Ou plutôt, baissons-les vers son sol. C'est de là que proviennent près de 2 kg d'échantillons que la mission chinoise Chang'e 5 a récemment rapportés sur Terre depuis une région sélène jusqu'alors inexplorée, près d'un demi-siècle après Apollo ! Leur analyse rajeunit les roches — datées d'« à peine » deux milliards d'années — réécrivant de fait le grand livre de l'histoire volcanique de notre satellite, comme le rapporte notre journaliste Franck Daninos *(p. 54)*. Et c'est à la lecture de cette réjouissante saga régolithique que nous vous invitons ce mois-ci, mais aussi à une (re)découverte beaucoup plus large : celle de toutes les avancées scientifiques qui ont marqué l'année 2021 ! Car derrière la pandémie de Covid-19 — qui occupe le devant de la scène depuis bientôt deux ans avec des coups de théâtre nommés Delta ou Omicron —, bien des innovations méritent d'être découvertes, c'est-à-dire — pour reprendre l'étymologie du mot — sorties de l'ombre pour être portées aux regards. Lecteurs attentifs, vous aurez noté que tous ces sujets ont déjà été présentés au fil de l'année dans les pages de *Sciences et Avenir-La Recherche*, mais cette compilation a le mérite de rafraîchir les mémoires et de mettre en perspective ces événements qui concernent toutes les disciplines : astronomie, médecine, archéologie… Qu'il s'agisse de rendre la vue à un aveugle grâce à l'optogénétique *(p. 39)*, de greffer un rein de cochon sur un humain *(p. 42)* ou d'observer pour la première fois un trou noir de masse intermédiaire *(p. 48)*, chaque récit est l'occasion de s'émerveiller encore des prouesses des scientifiques… Mais aussi de réaliser l'étendue des champs de connaissance qu'il nous reste à défricher. Avec cet objectif commun : mieux comprendre le monde qui nous entoure. Pour mieux le protéger ? C'est en tout cas ce à quoi s'attellent des ingénieurs suisses et canadiens rencontrés par notre journaliste Loïc Chauveau, qui ont mis au point des « ventilateurs » géants chargés de pomper le CO_2 afin de le soustraire de l'atmosphère et contribuer ainsi à limiter l'augmentation des températures mondiales *(p. 64)*. C'est aussi le travail de ces chercheurs qui développent des matériaux vivants d'ingénierie pour les bâtiments afin notamment de dépolluer l'air intérieur *(p. 60)*. Levons donc résolument les yeux au ciel et laissons-nous gagner par la douce sensation de vertige que nous procure tant de découvertes prometteuses ! ■ @carolechatelain

> « Notre compilation des événements marquants de 2021 est l'occasion de s'émerveiller des prouesses des scientifiques »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (12 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (12 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Directrice de la rédaction Carole CHATELAIN - 01.55.35.56.57
assistée de Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Rédacteurs en chef Mathieu NOWAK (mensuel) - 01.55.35.56.38
Philippe PAJOT (La Recherche) - 01.70.98.19.29
Vincent REA (hors-série) - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Olivier LASCAR (digital) - 01.55.35.56.15
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la direction de la rédaction
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Hugo JALINIÈRE (actualités, médecine) - 01.55.35.56.52
Rédaction Bernadette ARNAUD (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.44 - Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH
Ont participé à ce numéro Pierre BERLOQUIN, Nicolas GUTIERREZ C., Pierre KALDY, Léa FOURNASSON, Chloé HARDY, Anouk TOMAS
Secrétaire de rédaction
Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Maquette Horia BAHRI - 01.55.35.56.19
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Marine BENOIT (fondamental, archéologie) - 01.55.35.56.23 - Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70 - Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24 - Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15 - Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56
Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOIN - responsable projets digitaux
Jessica RIOS - cheffe de projet digital
Documentation Isabelle DO O'GOMES (cheffe de service) - 01.55.35.56.49 - Astrid SAINT AUGUSTE - 01.55.35.56.48
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Directeur général Philippe MENAT
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Christophe PERRUSSON
Publicité MediaObs. 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur délégué Philippe LÉONARD - 01.44.88.89.18
Directeur de publicité Sylvain MORTREUIL - 01.44.88.97.75
Exécution : Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Sciences et Avenir SAS
Président, Directeur de la publication : Claude PERDRIEL
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL
Multimédia Sciences et Avenir, 41 bis, avenue Bosquet, 75007 Paris. - Tél. : 01.55.35.56.00

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,014 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées
PEFC
pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart L'Obs jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés et un message l'Histoire jeté en diffusion partielle des abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

bouygues TELECOM

REF. Bouygues Telecom – Société anonyme au capital de 819 608 624,76 € – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS

Le smartphone qu'on aime, à prix magique.

Google est une marque de Google LLC. DAS : **Tête** 0,554 W/kg. **Tronc** 0,954 W/kg. **Membres** 1,930 W/kg.

xiaomi 11T | 5G

1 €(1)

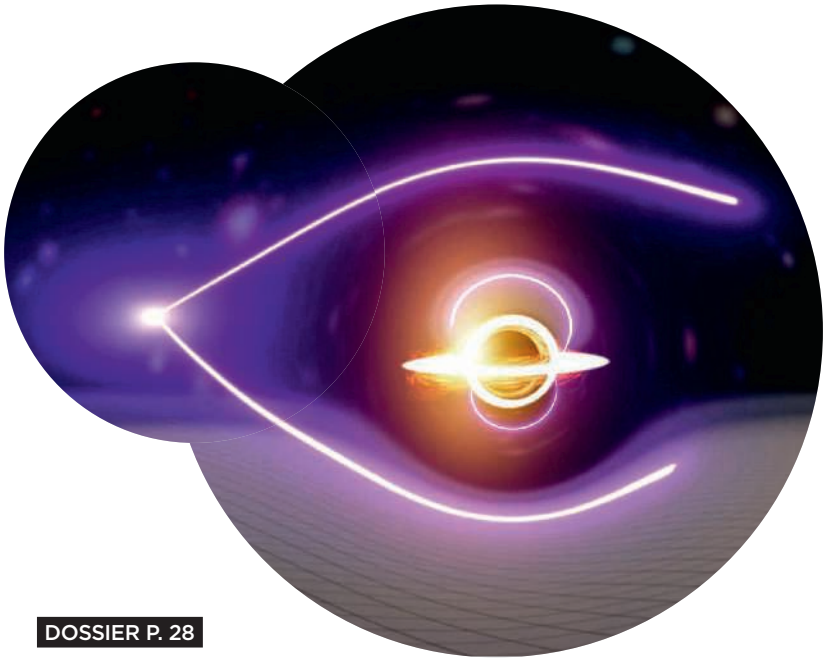
Grâce au Forfait Sensation avec **Avantages Smartphone 150 Go** après remboursement.

3106 appel gratuit | **en boutique** | **bouyguestelecom.fr**

Déploiement progressif du réseau 5G (3,5 GHz et 2,1 GHz), principalement en zones urbaines avec offre et mobile 5G compatibles. Couverture sur bouyguestelecom.fr.
Offre valable du 30/11 au 11/01/2022 pour la souscription à ce forfait (54,99 €/mois), engagement 24 mois. France métropolitaine. **(1) Soit 1 € payé après 50 € de remise immédiate et après 70 € remboursés sur demande sous 8 semaines après réception du dossier conforme. Conditions en boutique et sur le coupon de remboursement.**

SOMMAIRE

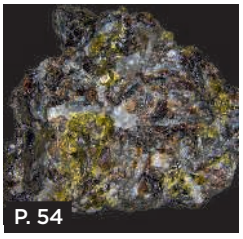
Sciences et Avenir / N° 899 / Janvier 2022



DOSSIER P. 28

Les 10 découvertes de l'année

2021 aura été riche en avancées scientifiques en médecine, astronomie, environnement, exploration du passé… Revivez les instants forts de ces prouesses et innovations qui permettent de mieux comprendre et préserver le monde qui nous entoure.



P. 54

Lune : les échantillons chinois parlent

En rapportant les plus jeunes cailloux lunaires jamais observés, un demi-siècle après Apollo, la mission Chang'e 5 réécrit l'histoire de notre satellite naturel.

P. 70

Antiviraux : de nouvelles armes contre le Covid-19

Ces médicaments innovants permettraient de faire chuter les hospitalisations et les décès. Un espoir alors que le nouveau variant Omicron rebat les cartes de l'évolution de la pandémie.

P. 82

Les écritures gauloises livrent leurs secrets

Un projet, mené par de jeunes chercheurs, a pour but le recensement de toutes les inscriptions laissées par les peuples gaulois depuis 2000 ans sur le territoire français.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Carole Chatelain

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** La « glace noire », quatrième état de l'eau, a été fabriquée / Des exoplanètes rocheuses plus exotiques que la Terre / L'accélération foudroyante du claquement de doigts

54 **Exploration lunaire : les échantillons chinois parlent**

60 **Les matériaux de construction prennent vie**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** La prospérité des posidonies élucidée / Le panda géant, génie insoupçonné du camouflage / L'appétit de la baleine façonne les océans

64 **Capter le CO_2 : des aspirateurs pour purifier l'atmosphère**

68 **Entretien avec Stefano Mancuso,** neurobiologiste végétal

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Une patiente élimine le VIH sans traitement / Le lien entre grand-mère et petits-enfants se voit dans le cerveau / Un gel prometteur pour réparer la moelle épinière

70 **Antiviraux : de nouvelles armes contre le Covid-19**

76 **Le traitement de la scoliose progresse enfin**

80 **Nutrition : les volailles sont toujours de la fête**

HISTOIRE

24 **ACTUALITÉS** Le gisant du Prince Noir fend l'armure / La première sépulture enfantine au monde / L'humain s'habillait en chêne

82 **Les écritures gauloises livrent leurs secrets**

TRANSVERSALES

88 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de janvier**

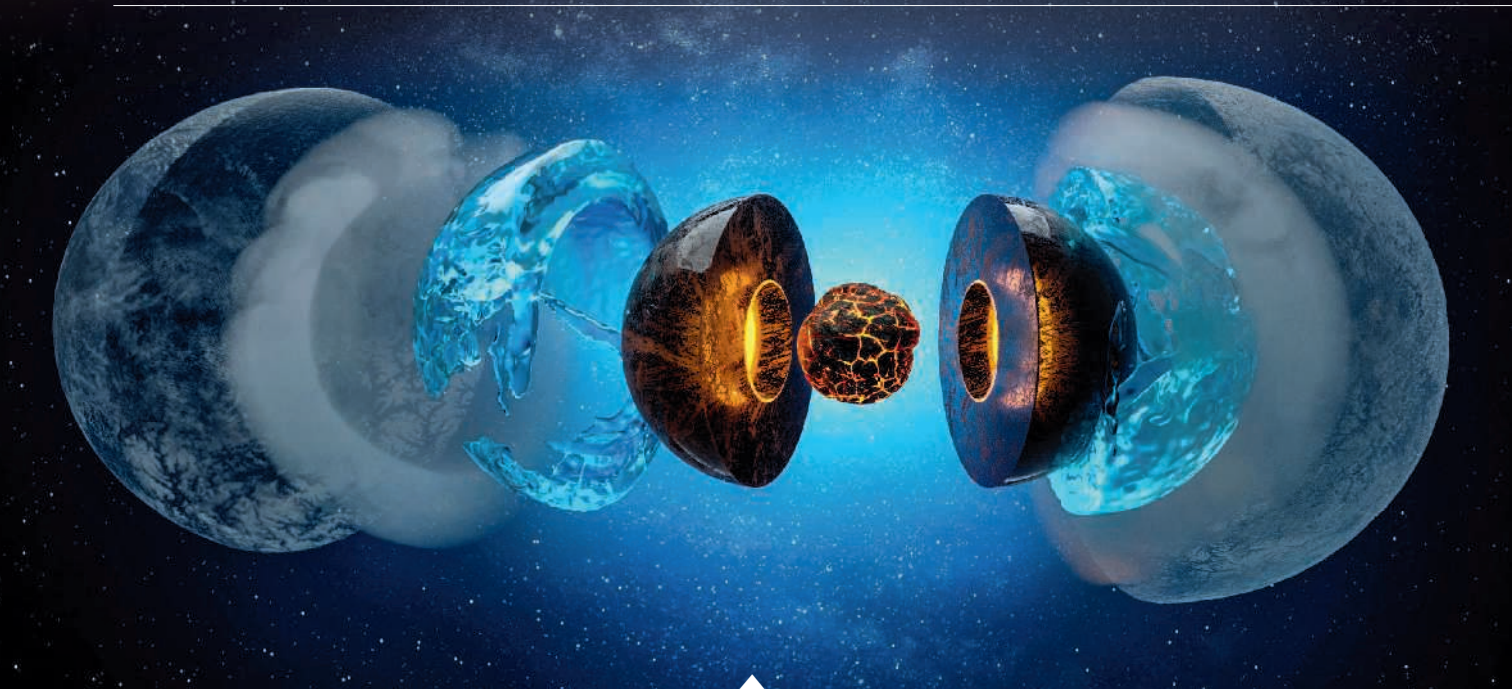
94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Solutions des jeux**

98 **Jeux**

CARL KNOX, OZGRAV - CNSA/GRAS/NAOC - ABA CAPRESS.COM - NPL - BRIDGEMAN IMAGES



Uranus et Neptune pourraient contenir une couche (en noir autour du noyau) de glace super-ionique, à l'origine de champs magnétiques (vue d'artiste).

La « glace noire », quatrième état de l'eau, a été fabriquée

Des chercheurs américains annoncent avoir maintenu dans un état stable une phase extrême et méconnue de l'eau.

Solide, liquide, gazeux… et « super-ionique » ! Un quatrième état de l'eau théorisé à la fin des années 1980 a enfin pu être synthétisé et observé en laboratoire par des scientifiques de l'Argonne National Laboratory, pôle de recherche public le plus important des États-Unis. Dans la revue *Nature Physics*, ils la décrivent comme un état mi-solide mi-liquide, quatre fois plus dense que la glace que nous connaissons et teinté d'une étrange couleur noire. Les chimistes savaient déjà que dans une molécule d'eau super-ionique, les ions hydrogène et oxygène se dissocient sous l'effet d'une très forte chaleur et d'une pression extrême. De sorte que l'eau super-ionique devient presque aussi conductrice qu'un métal.

Mieux comprendre la formation des planètes

En 2019, des physiciens américains avaient déjà apporté la preuve de son existence, sauf que leur échantillon n'avait pu être maintenu que quelques nanosecondes, rendant son étude approfondie impossible. Cette fois, les physiciens ont comprimé un échantillon d'eau dans une cellule à enclume de diamant, avant de le chauffer à l'aide de lasers. Puis, grâce à une source de lumière à rayons X à haute énergie, ils ont pu visualiser l'arrangement des atomes de l'échantillon et déterminer le type de phase dans lequel se trouvait l'eau. Surprise : la « glace noire » a commencé à apparaître à des températures comprises entre 627 °C et 1 627 °C et à une pression de 20 gigapascals. Des chiffres bien inférieurs à ceux prévus par les modèles — et pourtant vérifiés lors de l'expérience de 2019 (200 gigapascals et 5000 °C). « *Mais nous avons pu cartographier très précisément les propriétés de cette nouvelle glace, qui constitue une nouvelle phase de la matière* », explique Vitali Prakapenka, coauteur de l'étude. Poursuivre l'analyse de ces propriétés pourrait permettre de mieux comprendre les processus de formation des planètes. En effet, certains planétologues supposent que les noyaux d'Uranus et de Neptune sont recouverts de manteaux de glace super-ionique qui seraient à l'origine des champs magnétiques mal compris de ces mondes. ■ **M. B.**

@JAMMOTEHFORQUANTA MAGAZINE

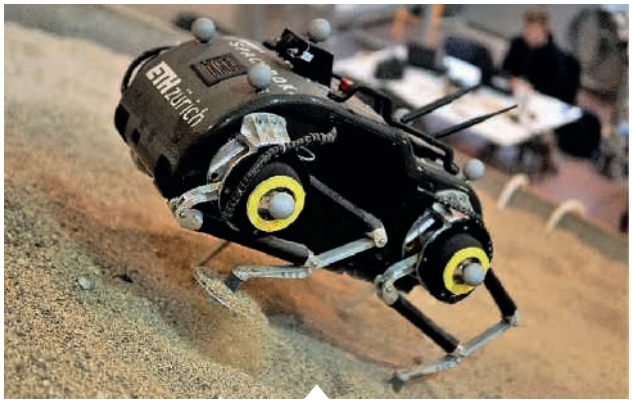
35 Le nombre de nouvelles détections d'ondes gravitationnelles

ASTRONOMIE C'est une avalanche d'ondes faisant vibrer l'espace-temps qu'ont enregistrée les instruments Virgo (Europe) et Ligo (États-Unis) entre novembre 2019 et mars 2020. Dans la plupart des cas, ces ondes gravitationnelles correspondent à des fusions entre deux trous noirs *(lire p. 48)*. Ce résultat porte à 90 le nombre d'événements enregistrés depuis la mise en route des instruments en 2015. **F. N.**

Du fluor dans une lointaine galaxie

ASTRONOMIE L'un des principaux constituants de nos dents et nos os a été détecté pour la première fois dans une galaxie très lointaine, à 12 milliards d'années-lumière, observée telle qu'elle était lorsque l'Univers n'avait encore que 1,4 milliard d'années. Créé à l'intérieur d'étoiles à courte durée de vie, le fluor a été expulsé sous forme de vents stellaires à leur mort. **J. I.**

SOURCE : M. FRANCO, UNIVERSITÉ DU HERDFORDSHIRE, ROYAUME-UNI.



ETH ZURICH

La machine a été conçue sur le modèle de l'antilope springbok.

SpaceBok, un robot pour arpenter Mars

EXPLORATION D'abord conçue pour la Lune, cette machine de 22 kg inspirée du springbok (une variété d'antilope) est en train d'être réadaptée pour les sols les plus accidentés de Mars, impraticables pour les rovers. Les pieds terminés par un socle circulaire à crampons semblent plus efficaces, sauf sur des pentes prononcées où le sable s'accumule dessus et les alourdit. **A. D.**

SOURCE : HENDRIK KOLVENBACH, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH, SUISSE.

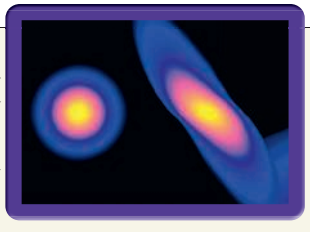
AARON CELESTIAN, LOS ANGELES COUNTY NATURAL HISTORY MUSEUM

La davemoaoite (en noir) piégée au sein de ce diamant n'avait encore jamais été observée dans la nature.

Un minéral issu des profondeurs de la Terre

Découverte à l'intérieur d'un diamant, la davemaoite se forme dans les couches lointaines du manteau.

GÉOLOGIE Composé de calcium, de silicium et d'oxygène, un nouveau minéral a été découvert dans un diamant extrait d'une mine au Botswana. Nommé « davemaoite » en l'honneur du géophysicien sino-américain Ho-Kwang Dave Mao qui en avait prédit l'existence, il avait été synthétisé en laboratoire en 1975 mais n'avait encore jamais été observé dans la nature. Le minéral ne se forme en effet qu'à des profondeurs comprises entre 660 et 900 km dans le manteau inférieur, où la pression est 200 000 fois plus importante qu'en surface. Dès qu'elle remonte dans le manteau supérieur et la croûte, où les pressions sont beaucoup plus faibles, la davemaoite se mue en d'autres composés. C'est en étant piégé dans un diamant que ce spécimen a pu conserver sa structure. Selon les chercheurs de l'université du Nevada (États-Unis) dans *Science*, la davemaoite constituerait entre 5 et 7 % des minéraux du manteau inférieur et jouerait un rôle essentiel dans le transport de la chaleur depuis les profondeurs de la Terre, processus qui alimente la tectonique des plaques. **F. D.**



NASA/TAEHO RYU (MPA)

À VOIR SUR LE NET

Le déchirement des étoiles aux abords d'un trou noir modélisé

ASTROPHYSIQUE Pour la première fois, des chercheurs de la Nasa ont modélisé avec précision la déformation d'étoiles lorsqu'elles s'approchent trop près d'un trou noir supermassif. Ce phénomène, appelé « spaghettification », est dû à des effets de marée gravitationnelle : la partie plus proche du trou noir subira plus de force de gravité que la partie éloignée, ce qui causera sa déformation, voire son déchirement complet. **L. F.**

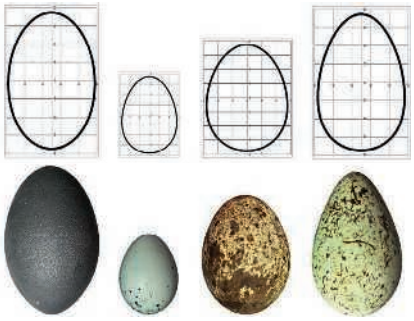
Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Une équation universelle décrit la forme des œufs

MATHÉMATIQUES La forme de l'œuf, qui avait toujours échappé à une description mathématique universellement applicable, a enfin son équation. Elle permet de décrire les quatre figures géométriques : sphère, ellipsoïde, ovoïde et pyriforme (en forme de poire). L'équation universelle ainsi obtenue sera utile dans de nombreux domaines, de la physique à l'industrie alimentaire ou l'architecture. **M. B.**

SOURCE : DARREN GRIFFIN, UNIVERSITÉ DU KENT, ROYAUME-UNI.

KLAUS RASSINGER ET GERHARD CAMMERER



Les quatre formes de l'œuf ont désormais leur loi mathématique (de gauche à droite : sphérique, ellipsoïde, ovoïde et pyriforme).

ELLE A DIT

« Si les jeunes femmes sont majoritaires dans l'enseignement supérieur, moins de 40 % de ces étudiantes se tournent vers les sciences. Environ 15 % en numérique et sciences de l'ingénieur »

Myrtille Gardet, inspectrice pédagogique régionale de physique-chimie, lors du colloque annuel à Paris de l'association Femmes et Sciences

Des exoplanètes rocheuses plus exotiques que la Terre

Cible privilégiée des chercheurs de vie extraterrestre, les exoplanètes restent des mondes très différents du nôtre, révèle une nouvelle étude.

Pour mieux connaître la composition des exoplanètes rocheuses, deux chercheurs ont eu l'idée de s'intéresser aux atmosphères des naines blanches, ces cadavres d'étoiles de type solaire. En éjectant leurs couches supérieures, celles-ci perturbent la trajectoire de leurs planètes, qui finissent par s'écraser dessus. À la surface de ces astres très denses, les éléments les plus légers — hélium et hydrogène — forment alors une atmosphère où demeurent les poussières de ces corps. L'analyse de 23 naines blanches situées à environ 650 années-lumière de la Terre a ainsi permis de reconstituer la composition de ces planètes disparues. Surprise : les minéraux détectés sont beaucoup plus divers qu'au sein du Système solaire. Ces exoplanètes étaient ainsi composées d'une plus grande variété de roches que la Terre et ses voisines. Certaines de ces compositions minérales inédites ont même nécessité de forger de nouveaux noms (pyroxénites de quartz, dunites de périclase) pour les désigner. **S. R.**

NOIRLAB/NSF/AURA/J. DA SILVA

L'analyse des débris de naines blanches a permis d'identifier des variétés de roches inconnues dans le Système solaire (vue d'artiste).

Orbital Reef, première station spatiale privée

ESPACE La station spatiale commerciale Orbital Reef vient d'être sélectionnée par la Nasa comme solution de remplacement après l'abandon de la Station spatiale internationale prévu en 2030. Développée par les sociétés américaines Blue Origin et Sierra Space, elle accueillera chercheurs, industriels et astronautes pour des activités en orbite basse. **S. R.**

BLUE ORIGIN / AFP

Voici l'aspect de la future station commerciale.

Il y aura du ketchup sur la planète Rouge

ESPACE **Le géant américain de l'agroalimentaire Heinz a annoncé la fabrication d'un ketchup « Mars compatible » : les tomates utilisées ont été cultivées dans un sol à la composition chimique proche de celle du régolithe martien, et dans des conditions semblables à celles de la planète Rouge. L'expérience menée par l'Aldrin Space Institute (États-Unis) visait aussi à montrer que la culture de tomates était possible dans des conditions extrêmes sur Terre.** **F. N.**

RIVAGES
DU MONDE

Prendre le large, c'est essentiel.

RCS Paris B 438 679 664 – 150 000 euros - Atout France IM 075 100 099 – Crédit Dreamstime

Croisières

EXPÉDITIONS

NORVÈGE • ARCTIQUE • ISLANDE • GROENLAND • SPITZBERG

A bord d'un véritable yacht d'expédition, conçu pour 180 passagers.
Un navire à propulsion hybride, pouvant stationner sans jeter l'ancre, pour une meilleure protection des sanctuaires marins. Des conférenciers spécialistes des régions polaires présents à bord.

SA01

Voguer. Échanger. Rêver

RÉSERVEZ VOTRE CROISIÈRE AU 01 83 96 85 03 OU SUR WWW.RIVAGESDUMONDE.FR

EN DEUX MOTS

INTERNET Fin octobre 2021, la société Facebook est devenue Meta, en lien avec son ambition de créer un métavers (*lire* S. et A. *n° 898*), mais le réseau social garde son nom originel. **ESPACE** La Russie a livré un module à la Station spatiale internationale : Prichal servira de nouveau port d'amarrage aux vaisseaux russes Soyouz et Progress. **CHIMIE** À partir d'un hydrogel réutilisable une quinzaine de fois, des scientifiques de l'université de Californie à Davis (États-Unis) ont mis au point un glaçon qui « ne fond pas ».

IBM

QUESTIONS À

Xavier Vasques

Directeur technique d'IBM France

Ordinateur quantique : le cap des 100 qubits a été franchi

Le 16 novembre dernier, IBM a annoncé la mise au point du processeur quantique Eagle, doté de 127 qubits, un qubit représentant l'unité élémentaire de stockage d'information quantique.

En quoi ce nouveau record est-il important ?
En dépassant les 100 qubits, une barre symbolique a été franchie. Eagle est ainsi le premier microprocesseur dont le comportement ne peut pas être simulé par un ordinateur classique. Le nombre de bits nécessaires pour cela dépasserait celui de la totalité des atomes qui constituent les 7,5 milliards d'humains.

Comment avez-vous fait ?
Nous avons utilisé une nouvelle architecture en 3D. Les qubits supraconducteurs sont gravés sur une couche, et la connectique qui permet de communiquer avec eux se trouve sur une autre couche, en dessous. Par rapport aux précédentes générations, cela facilite la manipulation, toujours délicate, des qubits.

Peut-on dès lors envisager des processeurs plus puissants ?
Oui, car cette architecture permet d'ajouter rapidement des qubits. Nous visons 433 dès l'année prochaine, 1121 en 2023, et de pouvoir dépasser le million de qubits assez rapidement. Nous développons parallèlement une nouvelle plateforme, Quantum System 2, afin de faciliter l'exploitation de ces processeurs. Cela devrait déboucher rapidement sur des applications logicielles concrètes.

Propos recueillis par F. N.

CALTECH/R. HURT (IPAC)

L'astre hypothétique serait 225 fois plus éloigné du Soleil que la Terre (vue d'artiste).

La planète 9 peut-être détectée en 1983

PLANÉTOLOGIE En réexaminant des signaux recueillis en 1983 par le télescope spatial infrarouge IRAS, un chercheur pense avoir identifié l'hypothétique « planète neuf », traquée depuis des décennies par les astronomes. L'objet, qui serait de 3 à 5 fois plus massif que la Terre, orbiterait à une distance 225 fois plus grande du Soleil que notre planète. **F. D.**

SOURCE : M. ROWAN-ROBINSON, IMPERIAL COLLEGE DE LONDRES, ROYAUME-UNI.

11,6 millions d'euros

Le prix de vente d'un manuscrit d'Einstein

PATRIMOINE Démarrées à 1,5 million d'euros, les enchères se sont envolées pour finir en bataille entre deux acheteurs par paliers de 200 000 euros. Rédigé par Albert Einstein et son collègue Michele Besso entre 1913 et 1914, le manuscrit détaille une partie du cheminement qui a conduit à l'élaboration de la théorie de la relativité générale publiée en 1915. **L. F.**

L'accélération foudroyante du claquement de doigts

PHYSIQUE L'accélération produite lors d'un claquement de doigts est plus élevée que celle donnée par un lanceur de base-ball professionnel. C'est ce que montrent des physiciens qui ont analysé l'énergie relâchée lors de ce petit mouvement. À titre de comparaison, le claquement se produit en 7 millisecondes, plus de 20 fois plus vite qu'un clignement d'œil. **L. F.**

SOURCE : RAGHAV ACHARYA, GEORGIA TECH, ÉTATS-UNIS.

GETTY IMAGES

*À force d'entendre qu'on ne vaut rien, on finit par le croire.

APPRENTIS D'AUTEUIL

À Apprentis d'Auteuil, nous voyons le meilleur en chacun des 30 000 jeunes(1) que nous accompagnons jour après jour au sein de nos 300 établissements et dispositifs, partout en France. Aidez-les à construire leur avenir.

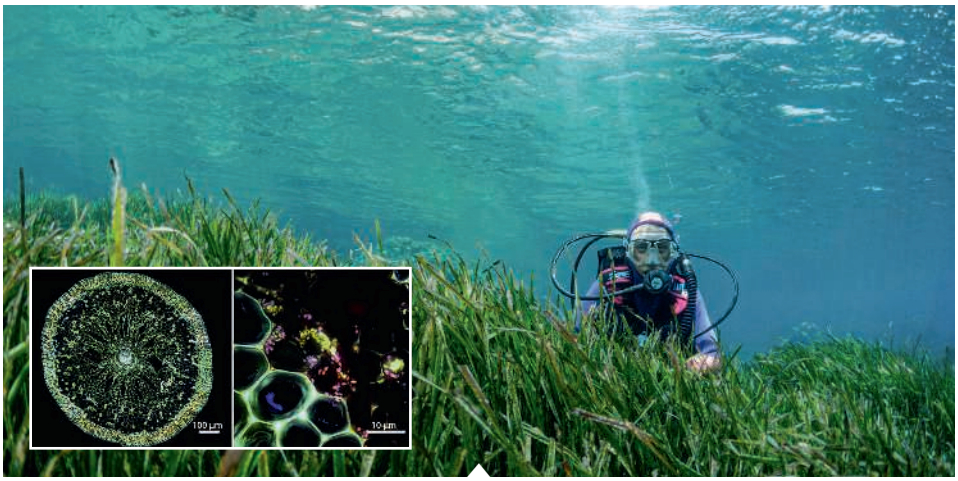
LA CONFIANCE PEUT SAUVER L'AVENIR

FAITES UN DON sur www.apprentis-auteuil.org

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2020.
Agence Marcel - © Aurélien Chauvaud.

La prospérité des posidonies élucidée

Le phénomène de symbiose associant bactéries et végétaux s'applique aussi aux plantes marines.



FRÉDÉRIC NEYOIT/ BIOSPHOTO · MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MARINE MIKROBIOLOGIE

La racine de posidonie (vue en coupe au microscope à gauche) abrite des bactéries (à droite, en fuchsia), une symbiose lui permettant de survivre lorsque l'azote vient à manquer.

Contrairement à ce que pensaient les scientifiques, l'association d'espèces bactériennes et végétales pour en tirer un bénéfice réciproque (symbiose) n'est pas l'apanage des plantes terrestres. Une étude menée par des biologistes de l'Institut Max-Planck de microbiologie marine à Brême (Allemagne) vient de montrer que les herbiers de Méditerranée abritent dans le tissu de leurs racines des bactéries qui leur fournissent, en échange de sucres, l'azote et les acides aminés nécessaires à leur développement.

Couvrant quelque 600 000 km² sur la plupart des côtes de notre planète, excepté l'Antarctique, les herbiers marins forment dans l'océan de véritables prairies de plantes à fleurs. Ces écosystèmes, berceaux d'une riche biodiversité, sont aussi des puits de carbone essentiels : ils stockent jusqu'à 1500 tonnes de dioxyde de carbone par hectare, soit trois à sept fois plus que les forêts.

Des bactéries changent l'azote en nutriment

Leur prospérité dans certaines régions du monde relevait cependant du mystère. Comment expliquer la survie d'herbiers marins dans de nombreuses régions côtières où l'azote n'est disponible qu'en faibles concentrations pendant de longues saisons ? C'est cette énigme que les chercheurs allemands viennent donc d'élucider. Les bactéries *Candidatus Celerinatantimonas neptuna (Ca. C. neptuna)* convertissent l'azote dissous dans l'eau et les sédiments en une forme utilisable par les herbiers.

De même que les micro-organismes fixateurs d'azote auraient pu favoriser la colonisation des sols pauvres en cet élément chimique par les premières plantes terrestres, les ancêtres de *Ca. C. neptuna* ont probablement permis aux plantes à fleurs d'envahir des habitats marins pauvres en azote il y a quelque 100 millions d'années. De telles symbioses pourraient aussi exister dans les herbiers tropicaux et les marais salés, estiment les scientifiques. ■ **S. R.**

B. GREEN/ZSL

Parmi la faune abritée par le fleuve anglais, on trouve plus de 4000 phoques.

Des phoques et des requins dans la Tamise

BIODIVERSITÉ Déclarée en partie « biologiquement morte » en 1957, la Tamise abrite aujourd'hui une faune riche. Des chercheurs y ont en effet recensé pas moins de 115 espèces de poissons, 92 espèces d'oiseaux, des hippocampes, des anguilles, 3200 phoques gris et 900 phoques communs. Ils ont même identifié trois nouvelles espèces de requins : le requin hâ, l'émissole tachetée et le requin épineux. Ce dernier est l'un des rares poissons venimeux du Royaume-Uni. **S. R.**

SOURCE : SOCIÉTÉ ZOOLOGIQUE DE LONDRES, ROYAUME-UNI.

La fonte du Groenland s'accélère

CLIMATOLOGIE
Au Groenland, les épisodes de fonte des glaces sont devenus plus fréquents et intenses au cours des 40 dernières années, selon une étude s'appuyant sur des données satellitaires. Le ruissellement des eaux de fonte a ainsi augmenté de 21 %. Sur la dernière décennie, 3,5 milliards de tonnes de glace fondue se sont déversées dans l'océan, augmentant le niveau de la mer et le risque d'inondation dans le monde. S. R.

SOURCE : THOMAS SLATER, UNIVERSITÉ DE LEEDS, ROYAUME-UNI.

ELLE A DIT

« C'est une forêt qui créera un nouveau poumon vert entre la forêt de Montmorency et celle de Saint-Germain-en-Laye »

Anne Locatelli-Biehlmann, directrice du syndicat d'aménagement de la plaine de Pierrelaye-Bessancourt (Val-d'Oise) où 233 400 plants d'arbres ont commencé à être plantés. Objectif : créer une forêt d'un million d'arbres.

GETTY IMAGES

Lorsqu'il est ébouillanté, le homard souffre, mais moins que le crabe.

Les crustacés ne sont pas égaux face à la douleur

ÉTHOLOGIE Crevettes, écrevisses et homards paraissent « moyennement sensibles » à la douleur. C'est l'une des conclusions d'une revue de la littérature scientifique commandée par le gouvernement britannique dans le cadre d'un projet de loi sur le bien-être animal. Huit critères liés à la sensation de douleur ont été pris en compte pour évaluer la sensibilité de divers invertébrés : les crabes sont jugés « très sensibles ». **C. H.**

SOURCE : LONDON SCHOOL OF ECONOMIC AND POLITICAL SCIENCE, ROYAUME-UNI.

Les pièges à CO_2 efficaces au long cours

ENTOMOLOGIE Pour réduire les populations de moustiques-tigres, les pièges à CO_2 sont efficaces sur le long terme mais ne sont pas utiles pour intervenir en urgence autour de maisons où des cas de dengue ou de chikungunya se seraient déclarés. C'est la conclusion d'une étude de l'Anses à la demande du gouvernement pour préparer les autorités sanitaires à la possible émergence de ces maladies virales en France. **L. C.**

ALAMY/ PHOTO12.COM

À VOIR SUR LE NET

Écoutez le cri de défense des abeilles contre les frelons

ÉTHOLOGIE Les abeilles asiatiques *Apis cerena* déclenchent une alarme vibrante particulièrement frénétique lorsque leur ruche est attaquée par des frelons géants. Les ouvrières se mettent à vibrer et résonner pour déclencher ce signal vibro-acoustique d'une intensité jusqu'alors inconnue, qui semble galvaniser la ruche entière contre les agresseurs. **R. M.**

SOURCE : NGOC T. PHAN, UNIVERSITÉ NATIONALE D'AGRICULTURE, VIÊT NAM.

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Des virus se cachent dans les herbiers du muséum

Des chercheurs ont identifié la souche d'un virus qui attaque le manioc en examinant des feuilles de cette plante récoltées en… 1928.

Des scientifiques ont réussi à retracer les origines de la mosaïque du manioc, une maladie virale très grave de cette plante africaine essentielle dans l'alimentation, en utilisant… l'herbier du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), à Paris. C'est en effet en examinant des feuilles d'une espèce apparentée récoltée en 1928 dans l'actuelle République centrafricaine que l'équipe du Centre de coopération internationale en recherche en agronomie (Cirad) de La Réunion a décelé les flétrissures typiques de la maladie. Ils ont pu identifier l'ARN produit par la plante en réponse à l'attaque virale. Ce qui a permis de retracer les mutations de la mosaïque sur près d'un siècle et remonter à l'ancêtre commun : il serait apparu en Afrique vers 1850. Ce résultat ouvre un vaste champ de recherche pour comprendre comment évoluent les pathogènes des plantes qui affectent toujours les récoltes. Des milliers d'échantillons d'herbiers attendent en effet qu'on vienne en extraire les traces des microbes pathogènes des cultures. **L. C.**

MNHN

Feuille de « Manihot glaziovii » collectée en 1928 atteinte par la mosaïque virale.

Le panda géant, génie insoupçonné du camouflage

Les taches noires et blanches le dissimulent de ses prédateurs dont la vision est plus limitée que celle de l'humain.

Si voyant de près avec ses grandes taches noires et blanches, le panda géant passe pourtant inaperçu de loin dans son milieu naturel formé de sous-bois en été et de zones enneigées l'hiver. C'est ce qu'indique une étude publiée dans *Nature* et dirigée par Tim Caro, chercheur à l'université de Bristol (Royaume-Uni) à partir de rares photos prises dans son milieu naturel du centre montagneux de la Chine. Un camouflage d'autant plus important que le panda géant n'hiberne pas et a plusieurs prédateurs : le tigre, le léopard et le dhole. Pour ces animaux à la vision plus limitée que l'humain, car reposant sur deux pigments visuels au lieu de trois, le camouflage de l'ursidé s'avère encore plus efficace, comme le montrent des photos filtrées en fonction de leur aptitude visuelle. **P. K.**

OSSI NOKELAINEN ET AL.

Été comme hiver, le pelage bicolore du panda se fond dans le paysage.

Les insectes aquatiques sont menacés par les néonicotinoïdes

BIODIVERSITÉ Ajouté à l'eau, le thiaclopride, un insecticide de type néonicotinoïde, fait chuter toutes les populations d'insectes à larve aquatique (libellule, éphémère, etc.), même lorsqu'il est trouvé en faible concentration dans les cours d'eau, selon des expériences menées aux Pays-Bas. Encore très utilisés en agriculture, les néonicotinoïdes pourraient ainsi contribuer à la baisse des populations d'oiseaux friands de ces insectes. **P. K.**

LEIDEN UNIVERSITY

Vue du site expérimental adjacent à un lac, où les larves sont prélevées dans de petits canaux.

SOURCE : HENRIK BARMENTLO, UNIVERSITÉ DE LEYDE, PAYS-BAS.

1630 millions de tonnes

Le CO_2 stocké par les végétaux en France

BIOMASSE Ce chiffre provient de l'exploitation par intelligence artificielle des données fournies par les satellites du programme européen Copernicus. Tous les ans, environ 40 millions de tonnes de carbone sur les 401 millions émises par l'Hexagone sont captées par les plantes et s'ajoutent à ce stock. **L. C.**

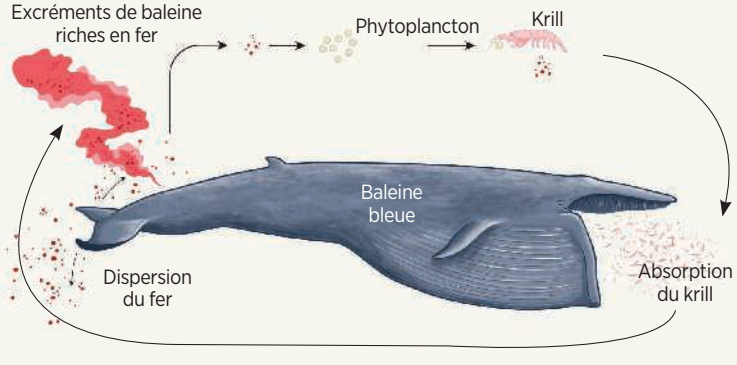
Le porte-conteneurs électrique autonome devient réalité

TRANSPORTS Après quatre ans de tests, le *Yara Birkeland*, porte-conteneurs 100 % électrique, a effectué son trajet inaugural en Norvège entre Horten et Oslo, soit 70 km. Il faudra encore deux ans d'essais pour valider le mode autonome. Il peut porter 3200 t, et un seul voyage remplace 40 000 trajets en poids lourds. **A. D.**

L'appétit de la baleine façonne les océans

OCÉANOLOGIE Une baleine bleue avale en moyenne 16 t de krill par jour, trois fois plus que ce qu'on pensait, selon une étude. Un appétit gargantuesque qui contribuait à façonner l'écosystème océanique avant qu'elles ne soient décimées par la chasse. En digérant ces minuscules crustacés riches en fer, elles dispersent sous forme de déjections ce nutriment essentiel au phytoplancton, des microalgues qui nourrissent nombre d'organismes marins et fournissent une grande part de l'oxygène. **H. J.**

SOURCE : V. SMETACEK, ALFRED WEGENER INSTITUTE, ALLEMAGNE.



SAVOCA ET AL., NATURE 2021

PRENDRE SOIN DE VOUS, C'EST NOTRE METIER

CHAÎNE THERMALE DU SOLEIL

agit naturellement pour votre santé

- 1er **choix de destinations** avec 20 stations thermales dans des cadres naturels exceptionnels.
- 1er **choix de cures** : Rhumatologie, Phlébologie, Voies Respiratoires, Appareil Digestif, Dermatologie…
- 1er **éventail de soins exclusifs**, mis au point en concertation avec les Centres Hospitaliers Universitaires, le Corps Médical et les équipes thermales.
- 1ère **équipe d'experts en médecine et soins thermaux**, complétée d'éducateurs sportifs, diététiciens, psychologues et sophrologues, en relation avec 52 associations de patients.
- 1er **choix de cures spécifiques** : Lombalgie, fibromyalgie, gonarthrose, acouphènes, troubles du sommeil, suite de cancer du sein…
- 1er **suivi médical de post-cure** à 3, 6 et 9 mois.
- 1er **choix d'hébergements** réservables en une fois avec votre cure.
- 1er **choix de cures pour les actifs** : mini-cures de 6 jours et cures nocturnes.
- 1er **choix des curistes** : 190 000 curistes nous ont fait confiance en 2019.

COVID-19 Charte sanitaire station thermale

TROUVEZ VOTRE CENTRE DE CURE chainethermale.fr

Documentation & renseignements gratuits

01 88 32 86 36

Je désire recevoir gratuitement le guide 2022 des cures de la Chaîne Thermale du Soleil :

Par courrier en envoyant ce coupon à :
Chaîne Thermale du Soleil - Centrale de réservation Flandres - 1283 route Fontaine Bouillon - 59230 Saint-Amand-les-Eaux

OU

en Flashant le QR CODE ci-dessous

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

Ville : ..... Code postal : .....

Téléphone : ..... Email : .....

Les données collectées sur ce coupon font l'objet d'un traitement au sens de la loi Informatique et Libertés du 6 janvier 1978 modifiée et du RGPD. Vos données seront conservées 3 ans afin de mieux communiquer avec vous et vous proposer des produits ou services analogues. Vous disposez, à tout moment, d'un droit d'accès, de rectification, de limitation, d'effacement et de portabilité de vos données, du droit de définir des directives relatives au sort de ces données après votre décès, d'un droit d'opposition et du droit de retirer votre consentement à tout moment. Vous pouvez exercer vos droits par voie postale à l'adresse suivante : CHAINE THERMALE DU SOLEIL, Service de traitement des données à caractère personnel, 31 avenue de l'Opéra, 75002 PARIS ou par email à : dpo@chainethermale.fr. Vous disposez également du droit d'introduire une réclamation auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

SA0122

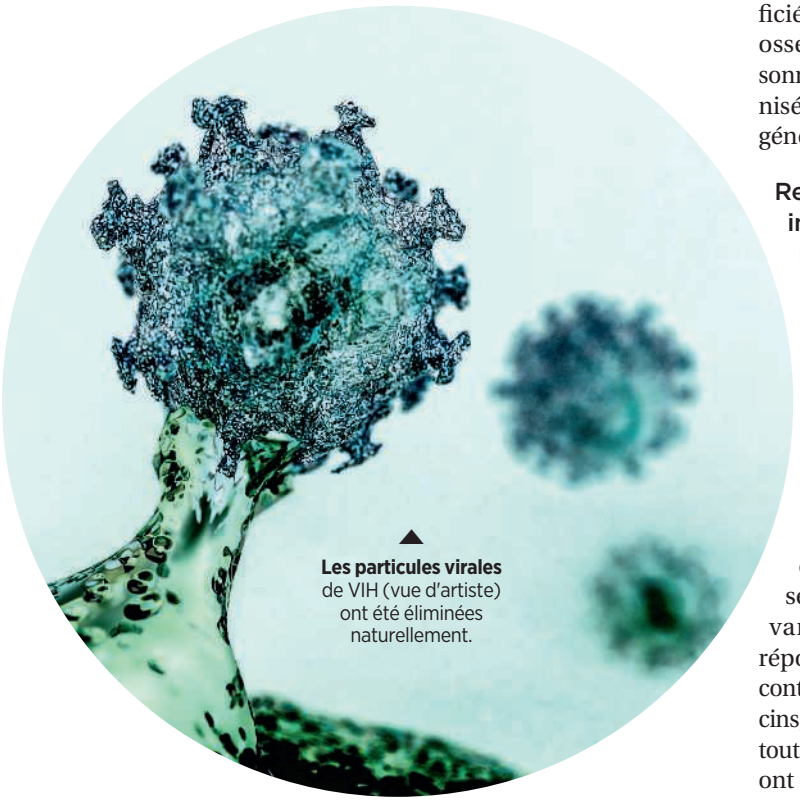
Agence MEESTERS - Crédit photo : Mariela Niels

Une patiente élimine le VIH sans traitement

C'est le deuxième cas d'éradication spontanée du virus du sida par l'organisme d'une malade. Il ranime l'espoir d'un vaccin contre cette maladie.

Le 16 novembre 2021, des chercheurs de l'institut américain Ragon, appartenant à l'hôpital général du Massachusetts, à l'université Harvard et au Massachusetts Institute of technology (États-Unis), ont révélé qu'une patiente séropositive aurait éliminé naturellement toute trace du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) dans son corps. Il s'agit d'une Argentine de 30 ans, diagnostiquée séropositive en 2013, chez qui le virus responsable du sida n'était plus détecté depuis huit ans. Afin de confirmer cette élimination exceptionnelle du VIH, les chercheurs ont analysé plus d'un milliard de cellules sanguines et 500 millions de cellules du placenta, sans y trouver une seule copie fonctionnelle du génome viral. Même résultat dans 150 millions de lymphocytes T CD4 (les cellules immunitaires ciblées par le virus) et dans 4,5 ml de plasma sanguin.

ANIMATE4.COM/SPL/PHANIE

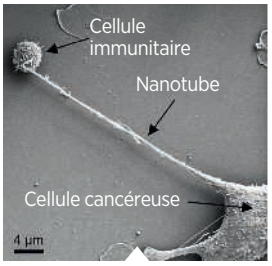


Les particules virales de VIH (vue d'artiste) ont été éliminées naturellement.

C'est cette même équipe qui avait déjà identifié en 2020 une patiente s'étant débarrassée du virus, une Californienne de 67 ans diagnostiquée séropositive en 1992. Une découverte faite lors d'une étude sur des patients dits contrôleurs d'élite, qui parviennent à réduire le virus au-delà des limites détectables sans besoin d'un traitement antiviral. Avant ces deux cas exceptionnels, les seuls malades ayant réussi à éliminer le VIH avaient bénéficié d'une greffe de moelle osseuse provenant de personnes naturellement immunisées grâce à une mutation génétique protectrice.

Reproduire ce contrôle immunitaire chez tous les malades

Pour les chercheurs, ce deuxième cas vient confirmer qu'éliminer le virus naturellement est certes rare mais possible. Ils espèrent maintenant pouvoir reproduire ce contrôle immunitaire chez tous les patients séropositifs. La clé pouvant être de stimuler la réponse des lymphocytes T contre le virus grâce à des vaccins, même si jusqu'à présent, toutes les tentatives en ce sens ont échoué. ■ **N. G. C.**



SAHA ET AL., NATURE NANOTECHNOLOGY

Le nanotentacule se déploie ici entre une cellule cancéreuse du sein et une cellule immunitaire.

Cette cellule cancéreuse se prend pour Dracula

ONCOLOGIE L'image dévoile une arme jusqu'alors inconnue des cellules cancéreuses : certaines d'entre elles étirent des nanotentacules qui pénètrent dans les cellules immunitaires pour aspirer leur « cœur énergétique », les mitochondries. Ce faisant, elles absorbent ses propriétés, deviennent plus puissantes, tout en évitant d'être détectées par le système immunitaire. **H. R.**

SOURCE : TANMOY SAHA, ÉCOLE DE MÉDECINE HARVARD, ÉTATS-UNIS.

Les connexions cérébrales naissent en rythme

NEUROLOGIE Les neurones de projection corticale (ICPN), qui assurent la communication entre les aires du cerveau, ont des différences anatomiques malgré des programmes génétiques similaires. Au cours du développement embryonnaire, il s'avère que ces différences essentielles au bon fonctionnement cérébral émergent en fonction d'un « tempo d'expression », soit la vitesse de lecture de leur partition génétique. **A. T.**

SOURCE : D. JABAUDON, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE.

• Dans dix ans, la France sera-t-elle encore une démocratie ? Un régime autoritaire ?

• Les Français veulent-ils être dirigés par un homme fort ?

• Le recours à la violence est-il compréhensible ?

• Les élections sont-elles faussées ?

• Voter est-il encore utile ?

• Faut-il contrôler les médias et les journalistes ?

Un numéro historique

Challenges

La grande enquête qui dérange

IL FAUT SAUVER LA DÉMOCRATIE

61% des Français l'estiment en danger

Le lien entre grand-mère et petits-enfants se voit dans le cerveau

Des chercheurs ont étudié l'activité cérébrale de 50 grands-mères à qui étaient montrées des images de différents membres de leur famille et d'inconnus.

Souvent exploré en biologie de l'évolution pour l'atout évolutif qu'il conférerait, le lien intergénérationnel entre les grands-mères et leurs petits-enfants a pu être observé au niveau neurologique.
En utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), une équipe de l'université Emory aux États-Unis a suivi l'activité cérébrale de 50 grands-mères à qui étaient montrées des images de leurs petits-enfants âgés de 3 à 12 ans, d'un de leurs enfants devenu adulte ou d'enfants et d'adultes inconnus. Face à l'image de leurs petits-enfants, les zones du cerveau impliquées dans l'empathie ainsi que dans le mouvement s'activent davantage. Et ce encore plus fortement lorsque les grands-mères disent s'investir dans la relation avec leurs petits-enfants. **H. J.**

GETTY IMAGES

Les zones du cerveau activées sont celles de l'empathie et du mouvement.

EN DEUX MOTS

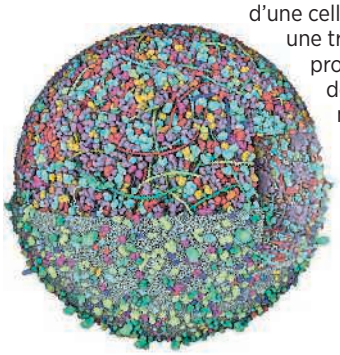
CANNABIS L'Agence nationale de sécurité du médicament a autorisé la start-up Overseed à ouvrir la première « R&D génétique et agronomique » pour une prochaine production de cannabis thérapeutique en France. **CARDIOLOGIE** La société française Carmat suspend les implantations de son cœur bio-artificiel à la suite d'un « problème qualité ». **ANXIÉTÉ** Une étude suédoise démontre qu'une heure d'exercice physique 3 fois par semaine permet d'améliorer l'état de personnes souffrant d'anxiété chronique.

Une IA cartographie l'intérieur d'une cellule

IMAGERIE Une technique mêlant microscopie, biochimie et intelligence artificielle a permis de reconstituer des structures de l'intérieur de cellules qui étaient invisibles auparavant. Cette nouvelle méthode baptisée « MuSIC » cartographie l'intérieur d'une cellule et a permis de déceler une trentaine de complexes protéiniques jusqu'ici inconnus, dont certains participent à la maturation des ARN ribosomaux. **N. G. C.**

SOURCE : TREY IDEKER, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SAN DIEGO, ÉTATS-UNIS.

MARTINA MARITAN



Modèle en 3D d'une cellule entière reconstituée par les chercheurs.

Les globules rouges sont aussi sentinelles de l'inflammation

BIOLOGIE Les globules rouges n'ont pas pour seul rôle de transporter l'oxygène dans le sang : ils servent aussi à alerter l'organisme de la présence de bactéries ou de tissus lésés, révèle une étude. Un récepteur spécifique, TLR9, leur permet de reconnaître de l'ADN bactérien ou mitochondrial et provoquer une inflammation. **P. K.**

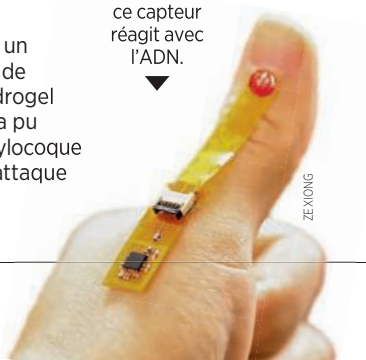
SOURCE : METTHEW LAM, UNIVERSITÉ DE PHILADELPHIE, ÉTATS-UNIS.

Un capteur d'ADN bactérien détecte l'infection d'une plaie

BIOTECHNOLOGIE Des ingénieurs ont testé un capteur sans fil et sans batterie qui permet de détecter l'infection de plaies grâce à un hydrogel sensible à l'ADN de bactéries. Le dispositif a pu repérer des quantités significatives de staphylocoque doré dans la plaie d'une souris avant que l'attaque bactérienne ne soit visible à l'œil nu. **H. J.**

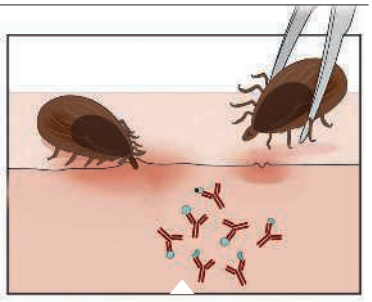
SOURCE : ZE XIONG, UNIVERSITÉ DE SINGAPOUR.

L'hydrogel contenu dans ce capteur réagit avec l'ADN.



ZE XIONG

Un vaccin à ARN contre les tiques



PETRKOPACEK ET AL./SCIENCE TRANSLATIONAL MEDICINE

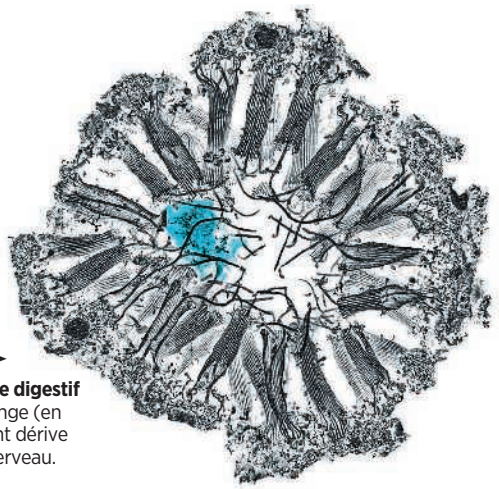
Les anticorps (en rouge) neutralisent les protéines salivaires, perturbant l'infection.

INFECTIOLOGIE Un vaccin à ARN dirigé contre des protéines présentes dans la salive de tique a permis d'éviter une infection par la bactérie responsable de la maladie de Lyme chez des cochons d'Inde. La réaction inflammatoire de la peau après piqûre a perturbé la transmission du pathogène. Chez l'humain, elle pourrait aussi rendre la piqûre plus sensible et faciliter ainsi la détection du parasite sur le corps. **P. K.**

SOURCE : ANDALEEB SAJID, UNIVERSITÉ YALE, ETATS-UNIS

69 000 Le nombre de décès supplémentaires du paludisme

ÉPIDÉMIOLOGIE En 2020, le nombre de cas de paludisme a atteint environ 241 millions, soit une hausse de près de 14 millions par rapport à 2019. Le nombre de décès imputables à cette maladie transmise par les moustiques a atteint 627 000, soit 69 000 décès de plus qu'en 2019. Une *« dégradation considérable »* attribuée aux multiples perturbations liées à la pandémie de Covid-19 selon l'OMS. **H. J.**



J.MUSSER, G.MIZZON, C.PAPE, N.SCHIEBER/EMBL

Le système digestif de l'éponge (en bleu) dont dérive notre cerveau.

Le cerveau humain descend d'une éponge d'eau douce

NEUROBIOLOGIE Beaucoup des structures permettant à notre cerveau de fonctionner se retrouvent déjà dans les cellules de *Spongila lacustris*, une ancienne espèce d'éponge d'eau douce. Brouillon d'éléments synaptiques, ébauche de neurones, tout y est 600 millions d'années plus tôt. Une profusion cellulaire étonnante dont la fonction première est d'assurer le nourrissage de l'animal. **H. R.**

SOURCE : J. MUSSER, LABORATOIRE DE BIOLOGIE MOLÉCULAIRE EUROPÉEN, ALLEMAGNE.

VITAMINE D POUR VOTRE IMMUNITÉ

Les mini-comprimés **D-immune et D-immune 25 µg** apportent respectivement 50 µg et 25 µg (2000 et 1000 UI*) de Vitamine D, soit 1000% et 500% des apports journaliers recommandés, pour une efficacité optimale.

Un seul mini-comprimé par jour garantit un **apport suffisant en Vitamine D** au quotidien, essentiel pour **maintenir les défenses immunitaires, favoriser la minéralisation osseuse et préserver un bon fonctionnement musculaire. Faire le plein de Vitamine D n'a jamais été aussi simple !** *Unités Internationales

■ En pharmacie boîtes 90 mini-comprimés (3 mois de programme) Sans gélatine. Conviennent aux végétariens.
D-immune ACL 6276968 / D-immune 25 µg ACL 6289633.
New Nordic au 01 85 12 12 12 (tarif local) - www.vitalco.com

STOP AU CHOLESTÉROL

Et si vous pouviez enfin faire baisser votre taux de mauvais cholestérol ?

ControlStérol aide à **réguler naturellement les taux de « bon » et « mauvais » cholestérol** (HDL et LDL) grâce à une combinaison **unique** d'extraits concentrés d'Ail noir et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels.

Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à **diminuer le « mauvais » cholestérol** LDL (qui favorise la formation de plaques lorsqu'il est en excès), limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en **augmentant le « bon » cholestérol** HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

● ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gélules « jour » & 30 gélules « nuit ») ACL 6260490. En pharmacie et sur www.controlsterol.com - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local)

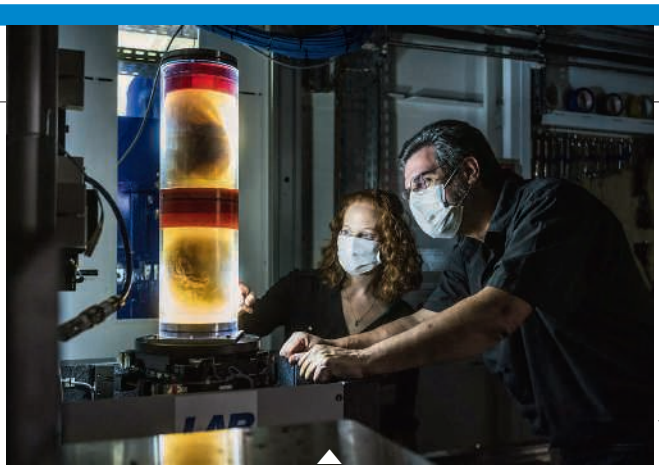
POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE

Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

IL A DIT

« Lorsque l'animal se trompait de destination, nous arrivions à prédire l'endroit où il allait se rendre en analysant son activité neuronale : c'était comme lire dans ses pensées ! »

Hiroshi Ito, chercheur à l'Institut Max-Planck du cerveau (Allemagne), à propos de la découverte d'une zone cérébrale utilisée pour garder en tête la destination d'un trajet chez le rat.



S.CANDÉ/ESRF

Paul Tafforeau a adapté ses techniques d'analyse des fossiles aux poumons.

Le synchrotron au service de la lutte contre le Covid-19

IMAGERIE Le paléontologue Paul Tafforeau a mis au point une nouvelle technique d'imagerie biomédicale qui permet de scanner des organes complets à des résolutions encore jamais atteintes. Elle repose sur les faisceaux de rayons X du synchrotron de Grenoble qui sont 100 milliards de fois plus lumineux que ceux d'une radiographie médicale. Le chercheur avait été sollicité par des médecins pour adapter ses techniques d'analyse de fossiles à la visualisation des lésions pulmonaires causées par le Covid-19. **J. I.**

SOURCE : PAUL TAFFOREAU, EUROPEAN SYNCHROTON RADIATION FACILITY, FRANCE.

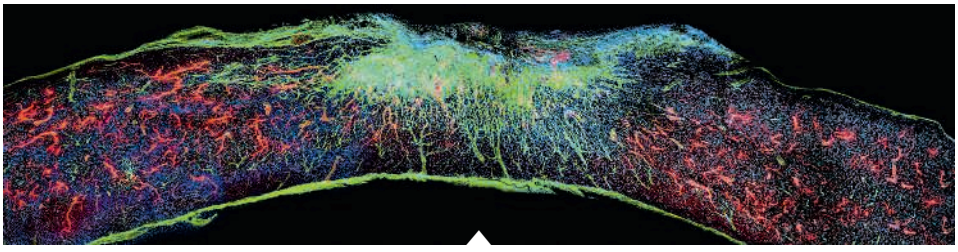
Un antibiotique contre les bactéries résistantes

THÉRAPEUTIQUE Contre la résistance croissante des bactéries aux antibiotiques, des chercheurs annoncent la découverte d'un produit oral efficace contre la plupart d'entre elles, résistantes ou non. Synthétisé à partir de la clindamycine, un ancien antibiotique, l'iboxamycine tue les bactéries pathogènes chez la souris en bloquant la synthèse de leurs protéines. Reste à le tester chez l'humain. **P. K.**

SOURCE : MJ. MITCHELTREE, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

Un gel prometteur pour réparer la moelle épinière

Le traitement permettrait de régénérer les cellules de la moelle épinière après une lésion de la colonne vertébrale.



S. I. STUPP LABORATORY/NORTHWESTERN UNIVERSITY

Le tissu sanguin (en rouge) se régénère au sein de la moelle épinière de la souris (coupe longitudinale).

Un traitement inédit dévoilé par des chercheurs américains donne un nouvel espoir de régénérer les cellules de la moelle épinière après une lésion de la colonne vertébrale. Il s'agit d'un gel à injecter directement à proximité de la lésion. Il est composé de nanofibres imitant la structure de la « matrice extracellulaire », un réseau de molécules qui se développe naturellement autour du tissu cellulaire. Chaque nanofibre est faite de centaines de milliers de molécules, des peptides, qui transmettent des signaux facilitant la régénération des nerfs. Pour l'instant, il n'a été testé que sur la souris, mais les résultats ont de quoi interpeller : injecté 24 heures après la section de la colonne vertébrale des rongeurs, le gel leur permettait de remarcher presque normalement quatre semaines plus tard. **H. J.**

Ce poisson-robot délivre des anticancers

ONCOLOGIE **Pour acheminer les molécules de chimiothérapie directement dans les cellules cancéreuses, des chimistes ont mis au point des microrobots pisciformes imprimés en 3D à partir d'un hydrogel sensible à l'acidité. Arrivés près d'une tumeur, où l'acidité est élevée, ils pourraient se dilater et libérer les molécules thérapeutiques. Une administration plus ciblée pour diminuer les effets secondaires.** **A. T.**

SOURCE : J. LI, L. ZHANG, D. WU, UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE CHINE.

JIAWEN LI ET AL.

Le microrobot introduit dans les cellules pourrait y libérer des molécules thérapeutiques.

Le Parisien
CRÉER DU LIEN

CONSOMMER AUTREMENT ?

PARTAGEONS LES SOLUTIONS.

DÉCOUVREZ
LA NOUVELLE
APPLICATION
LE PARISIEN

ALLIE - UNSPLASH

DEAN AND CHAPTER OF CANTERBURY

L'effigie de métal, créée à la mort du chevalier en 1376, est visible dans la cathédrale de Canterbury (Royaume-Uni).

Le gisant du Prince Noir fend l'armure

L'imposante sculpture qui orne la tombe du fils du roi Edouard III, figure de l'Angleterre médiévale, vient de faire l'objet d'une étude approfondie.

Depuis plus de six siècles, le « Prince Noir », Edward de Woodstock, fils du roi Edouard III et guerrier redoutable, gît sous les voûtes silencieuses de la cathédrale de Canterbury (Royaume-Uni). Il repose sous son effigie de métal grandeur nature créée à sa mort en 1376 pour orner sa sépulture. Pour la première fois, des chercheurs ont étudié en détail cette sculpture singulière pour son temps, tant par sa précocité que par sa rareté : seules six grandes sculptures en métal coulé de l'Angleterre médiévale sont parvenues jusqu'à nous. Grâce à des techniques d'imagerie médicale et chimique comme la spectrométrie de fluorescence des rayons X, une équipe de l'Institut Courtauld, à Londres, a pu sonder le gisant de l'intérieur pour mieux comprendre sa structure et sa fabrication.

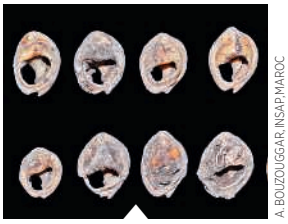
Un travail de précision réalisé par un armurier

« Nous avons trouvé des boulons et des broches qui maintenaient l'ensemble à la façon d'un puzzle. Des preuves des étapes de sa fabrication que personne n'avait vues depuis les années 1380 », s'émeut Emily Pegues, coauteure de l'étude publiée dans *The Burlington Magazine*. Il est ainsi apparu que seul un armurier, et non un sculpteur, pouvait être à l'origine de ce travail de précision reproduisant au rivet près l'habit de combat du défunt. *« Les artisans ont exploité l'articulation de l'armure pour dissimuler les joints : en cachant par exemple sous l'encolure du camail, la cotte de mailles qui protège le crâne, un joint structurel majeur qui relie la tête au corps. Ou encore en masquant le joint reliant les avant-bras aux bras supérieurs sous le couter (la défense du coude)* », assure la scientifique. Une preuve de plus que l'art du Moyen Âge était sophistiqué.

Quant au surnom de « Prince Noir », le mystère demeure : était-ce pour l'armure noire en fer bruni qu'il aurait portée lors des combats ? Ou pour sa réputation de guerrier brutal et sans pitié ? Les massacres qu'il a ordonnés durant la guerre de Cent Ans à Calais, Poitiers ou Limoges penchent en faveur de la seconde option. ■ **M. B.**

La plus ancienne parure du monde

ARCHÉOLOGIE Ces petits coquillages marins façonnés et percés ont été découverts dans des sédiments datés de 142 000 ans, ce qui en fait les éléments de la plus ancienne parure préhistorique connue à ce jour. Les 32 coquilles extraites de la grotte de Bizmoune près d'Essaouira (Maroc) pourraient avoir servi à la confection de colliers ou de bracelets. Elles repoussent de près de 20 000 ans l'existence des plus vieux ornements connus jusque-là. **B. A.**



A. BOUZOUGGAR, INSAP, MAROC

Les coquillages de la parure sont datés de 142 000 ans.

IL A DIT

« La lutte contre le trafic de biens culturels ne peut réussir que si tous les acteurs impliqués dans le marché de l'art coopèrent en toute transparence »

Lazare Eloundou-Assomo, directeur Culture et situations d'urgence de l'Unesco, à l'occasion d'une conférence internationale.
Lire son interview complète : **sciav.fr/899trafic**

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

Chez votre marchand de journaux et chez votre libraire

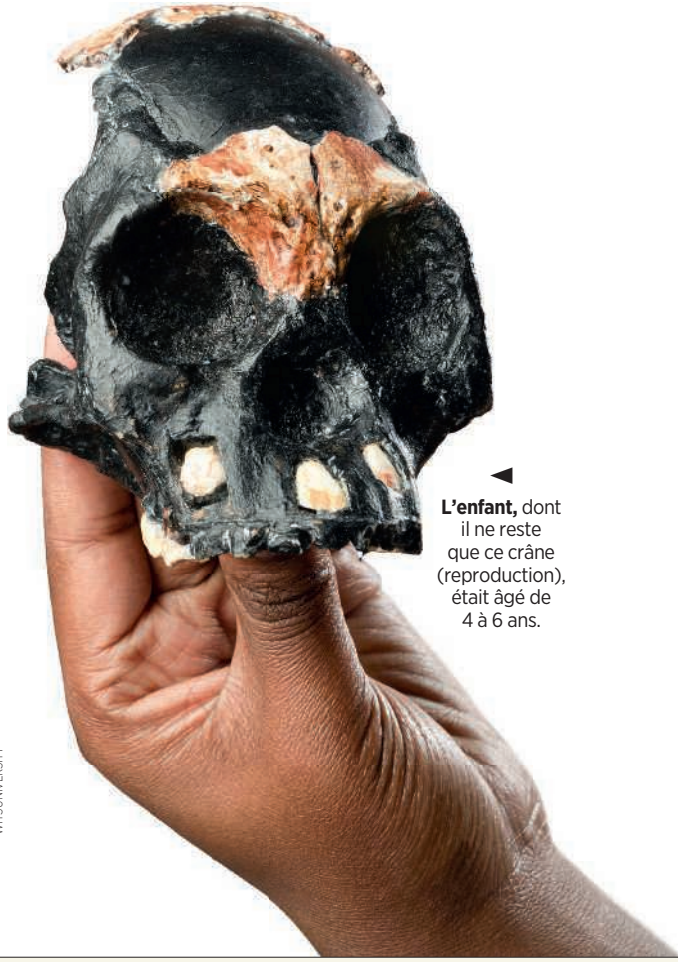
35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

La première sépulture enfantine au monde

Datés d'environ 250 000 ans, des restes humains découverts en Afrique du Sud appartiendraient à un enfant de l'espèce « Homo naledi ».

Vingt-huit fragments d'un crâne minuscule et six petites dents ont été découverts dans une alcôve des grottes souterraines de Rising Star, près de Johannesbourg, en Afrique du Sud. Datés d'environ 250 000 ans, ils appartenaient à un enfant *Homo naledi*, une espèce intrigante mêlant des traits archaïques et modernes. Ces restes enfantins relancent l'hypothèse selon laquelle ces hominidés inhumaient leurs morts. Selon l'étude publiée dans *PaleoAnthropology*, le crâne du bambin âgé de 4 à 6 ans pourrait avoir été déposé intentionnellement sur une étagère naturelle de calcaire. « *Il n'y a pas d'autres ossements, pourtant plus résistants que ceux de la tête* », indique Lee Berger, de l'université du Witwatersrand (Afrique du Sud). Ce qui exclut l'hypothèse que l'enfant ait rampé jusque-là avant d'y mourir ; et le crâne ne porte aucune marque de blessure montrant qu'un prédateur l'y aurait traîné. Il pourrait donc s'agir de la première sépulture enfantine au monde, celle de l'enfant *H. sapiens* de Mtoto, au Kenya, publiée début 2021, n'ayant que 78 000 ans. ■ **R. M.**



WITS UNIVERSITY

L'enfant, dont il ne reste que ce crâne (reproduction), était âgé de 4 à 6 ans.

C. MOULHERAT

QUESTIONS À

Christophe Moulherat

Expert en textiles anciens, maître de conférences à Sorbonne Université-Abou Dhabi (Émirats arabes unis)

L'humain s'habillait en chêne

Il y a 8700 ans, les plus vieux textiles utilisés sur le célèbre site néolithique de Catalhöyuk, en Turquie, auraient été composés de fibres libériennes de chêne plutôt que de lin comme on le pensait jusque-là, selon une étude parue dans *Antiquity*.

Que révèle cette découverte ?
Depuis les années 1960, des fragments de textiles ont été trouvés à Catalhöyuk. D'abord identifiés en tant que laine pour les plus anciens, et plus tard de lin, de récentes analyses ont fait apparaître qu'il s'agissait en fait de liber de chêne (fibre issue de l'écorce).

S'agit-il des plus vieux « textiles » du monde ?
Il faut déjà définir ce qu'on qualifie de « textile ». Si l'on pense à la « sparterie », des objets fabriqués, vannés ou tissés en fibres végétales, on peut remonter à des âges de 12 000 ans en Amérique, et 30 000 ans en Europe. En revanche, pour les textiles confectionnés à partir de métiers à tisser, Catalöyuk reste un sérieux candidat.

Y a-t-il eu un ordre de production de ces matériaux au fil du temps ?
Les plus anciens tissages étaient réalisés à base de liber de saule, de tilleul ou autre. Quand l'usage du lin est survenu vers 6000 ans avant J.-C. au Proche-Orient, il ne s'agissait plus d'écorces d'arbre, mais toujours de fibres végétales issues des tiges. Les plus anciens vestiges de coton connus datent du sixième millénaire avant J.-C. au Pakistan. Le filage de la laine lié à la domestication animale est plutôt apparu vers 4000 avant J.-C.

Propos recueillis par B. A.

Visitez le sanctuaire d'Olympie en 3D

ANTIQUITÉ Qu'il s'agisse du Bouleutérion, du temple de Zeus ou de l'atelier du sculpteur Phidias… la célèbre cité grecque d'Olympie a été recréée numériquement par le ministère grec de la Culture et des Sports associé à Microsoft. Ce sont 27 monuments, dont le stade olympique où se sont déroulés les premiers jeux en 776 avant J.-C., qu'il est désormais possible de visiter depuis son salon ! Accessible sur le site : sciav.fr/899olympie **B. A.**

HELENICREPUBLICMINISTRY CULTURE AND SPORTS, MICROSOFT

Le temple d'Héra (au centre) est l'un des 27 monuments reconstitués.

156 Le nombre d'éruptions volcaniques liées à l'effondrement de dynasties chinoises

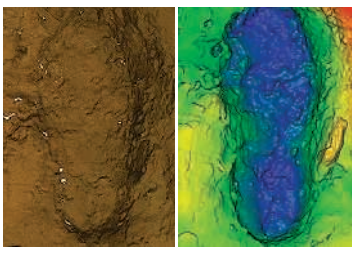
VULCANOLOGIE Les volcans pourraient être à l'origine de la chute de plusieurs dynasties chinoises. Des chercheurs chinois ont découvert que 62 des 68 effondrements dynastiques dénombrés entre 850 et 1911 auraient été précédés par au moins une éruption volcanique majeure. Le refroidissement brutal du climat généré par ces événements aurait affecté l'agriculture, favorisant l'instabilité socioéconomique et les guerres. **B. A.**

SOURCE : CHAOCHAO GAO, UNIVERSITÉ ZHEJIANG, CHINE.

Les premières empreintes de chaussures sont en France

ARCHÉOLOGIE Des chaussures souples à la façon de mocassins en cuir étaient utilisées à l'époque gravettienne il y a 30 000 ans. C'est ce que démontre l'identification de sept empreintes de pas chaussés imprimées dans les sols argileux de la grotte de Cussac au cœur du Périgord (Dordogne). Il s'agit du plus ancien témoignage direct du port de chaussures. **B. A.**

LYSIANNA LEDOUX ET AL.



Les sept empreintes retrouvées (à droite en carte de profondeur) ont 30 000 ans.

SOURCE : LYSIANNA LEDOUX, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE.

WALT DISNEY STUDIOS MOTION PICTURES - KUNSTSAMMLUNGEN & MUSEEN AUGSBURG - LEEMAGE

www.sciencesetavenir.fr
www.larecherche.fr
Sciences et Avenir et *La Recherche* au quotidien

NUMÉRIQUE

Deux documents stockés sur ADN entrent aux Archives nationales

La Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789 et la Déclaration des droits de la femme et de la citoyenne de 1791 ont été encodées sur ADN, pouvant être conservées pendant plusieurs dizaines de milliers d'années. Les deux capsules sont entrées dans l'Armoire de fer des Archives nationales, qui protège les documents les plus précieux de l'histoire de France. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/DDHCADN

S. LEMAIRE / CNRS - SORBONNE UNIVERSITÉ

OCÉANOGRAPHIE

Reportage vidéo à bord de la goélette scientifique « Tara »

En escale à Rio de Janeiro, au Brésil, le voilier océanographique français destiné à la recherche scientifique a ouvert ses portes à notre envoyé spécial pour présenter les objectifs de sa dernière mission « Microbiomes » et le matériel scientifique nécessaire pour la mener à bien. sciav.fr/899tara

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

L'IA fait parler les Beatles

The Beatles : Get Back diffusé par Disney+ a utilisé des algorithmes de *machine learning* pour extraire les discussions que les musiciens couvraient par le bruit de leurs instruments. sciav.fr/899beatles

5 minutes

Découverte d'un rare trésor romain

Des pièces d'argent et objets de l'époque romaine ont été découverts à Augsbourg en Allemagne, témoignant de l'importance de l'ancienne capitale de la Rhétie. sciav.fr/899treso

10 minutes

Philip K. Dick par l'essayiste Ariel Kyrou

L'interview vidéo de l'essayiste Ariel Kyrou sur la façon dont l'œuvre de Philip K. Dick irrigue notre actualité, de la réalité virtuelle au réchauffement climatique *(lire aussi p. 90)*. sciav.fr/899dick

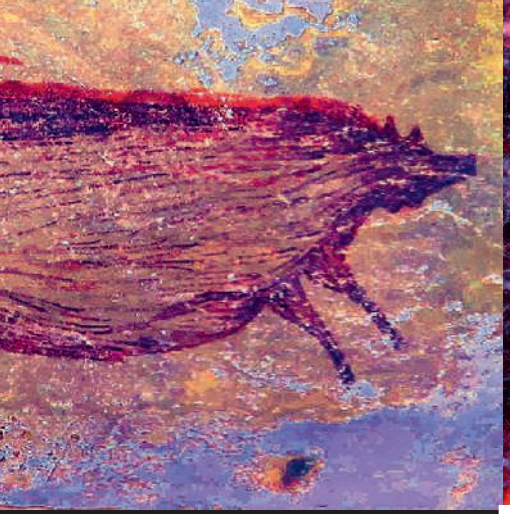
Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

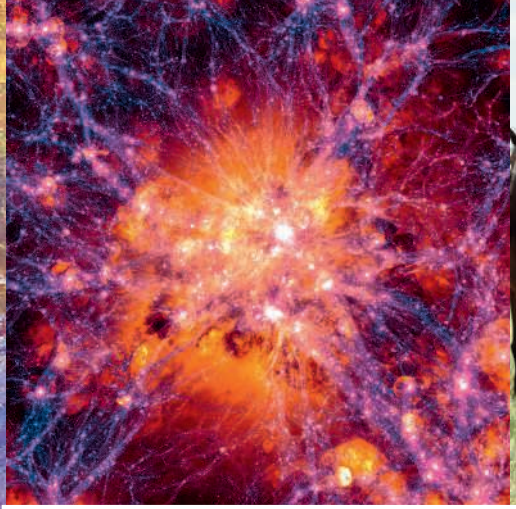
Les 10 découvertes de l'année

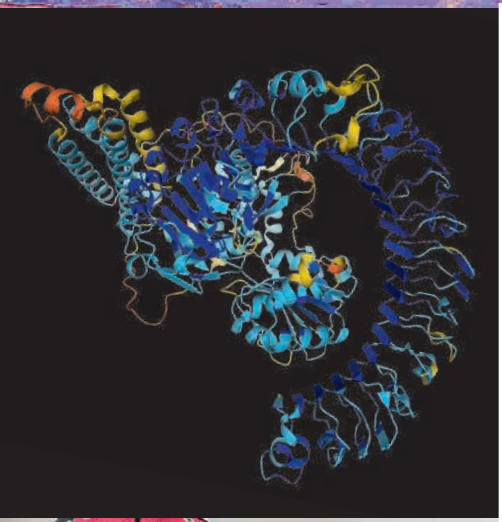
2021 a été riche en avancées scientifiques dans des domaines aussi divers que l'astronomie (observation de trous noirs, sismologie de Mars), la biologie (repliement des protéines), la médecine avec des technologies innovantes à l'honneur (xénogreffe, optogénétique), ou encore l'exploration du passé (généalogie du cheval, record de datation d'ADN). En voici le récit.

Dossier réalisé par
la rédaction

AA OKTAVIANA - THE ILLUSTRIS COLLABORATION - LUDOVIC ORLANDO - DEEPMIND - JOE CARROTTA FOR NYU LANGONE HEALTH/REUTERS - SAHEL ET AL., NATURE 2021 - DAVID DUCROS/IPGP - CARL KNOX, OZGRAV - BETH ZAIKEN/CENTRE FOR PALAEOGENETICS - REIDAR HAHN, FERMILAB







SOMMAIRE

▶ La plus vieille peinture rupestre en Indonésie p. 30

▶ On a trouvé la matière cachée de l'Univers p. 33

▶ Le berceau du cheval domestique identifié p. 34

▶ Le repliement des protéines résolu par IA p. 36

▶ L'optogénétique rend la vue à un aveugle p. 39

▶ En images : les animaux et les insectes de l'année p. 40

▶ Greffe réussie d'un rein de porc à un humain p. 42

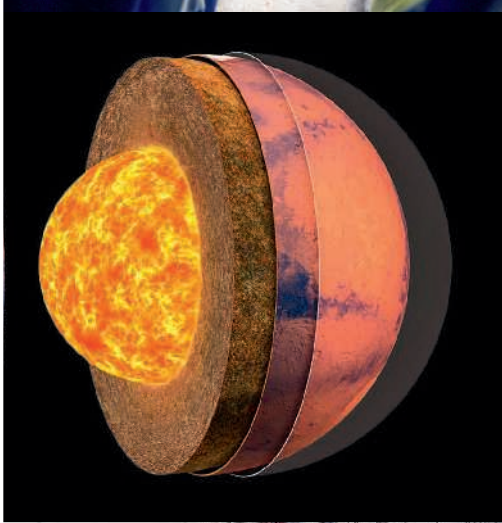
▶ La structure interne de Mars révélée p. 45

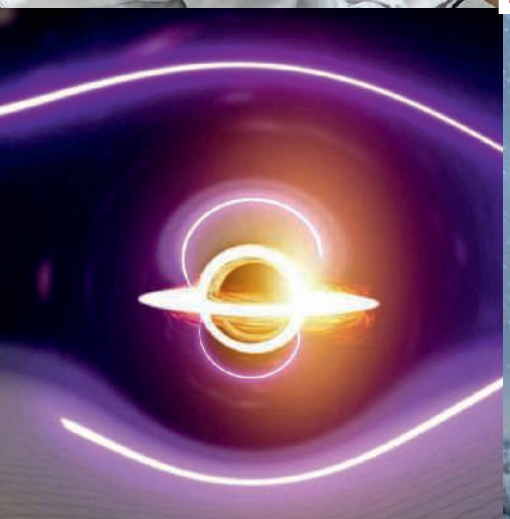
▶ Deux particules bousculent la physique p. 46

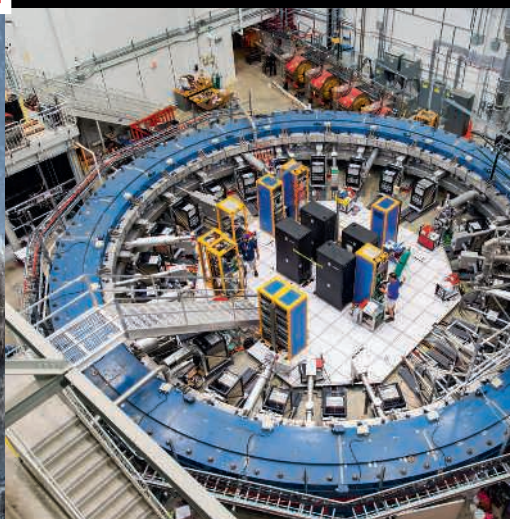
▶ La famille des trous noirs au complet p. 48

▶ De l'ADN de mammouth d'un million d'années p. 51

▶ Les autres événements marquants de 2021 p. 52







1

Les plus vieilles fresques sont en Indonésie

Un saut dans le temps mais aussi dans l'espace : c'est en Asie et non plus en Europe qu'il faut désormais situer la naissance de l'art paléolithique. Mais elle pourrait être bien plus ancienne encore et se trouver sur le continent africain.

Dissimulée dans les profondeurs d'une vallée de l'épaisse jungle de Sulawesi (Indonésie), la plus grande île de la Wallacea — une zone biogéographique qui sépare l'Asie continentale de l'Australie et de la Papouasie-Nouvelle-Guinée —, la grotte de Leang Tedongnge abrite une peinture rupestre remontant à 45 500 ans ! Un abri-sous-roche forestier difficile d'accès, dans une région pourtant située à une cinquantaine de kilomètres seulement de la ville animée de Macassar, la capitale de la province. L'information a été publiée en janvier 2021 dans la revue *Nature*.

Tracée à l'ocre rouge, apparaît la silhouette d'un « cochon verruqueux » — un animal endémique de la région —, haute de 54 centimètres pour 1,36 mètre de long. La figure de ce suidé à courtes pattes est représentée avec des excroissances faciales typiques de celles que portent les adultes mâles de l'espèce. L'ocre des peintures rupestres ne pouvant être daté directement, les archéologues de l'université Griffith, à Brisbane (Australie), ont appliqué la méthode de l'uranium-thorium sur des échantillons de calcite (des dépôts naturels de carbonate de calcium) prélevés sur les figures. Résultat : avec ce suidé sauvage décelé dans le secret des parois du site de Leang Tedongnge, la cavité ornée est aujourd'hui considérée par nombre de spécialistes comme le site hébergeant le plus vieil art rupestre connu.

45 500 ans

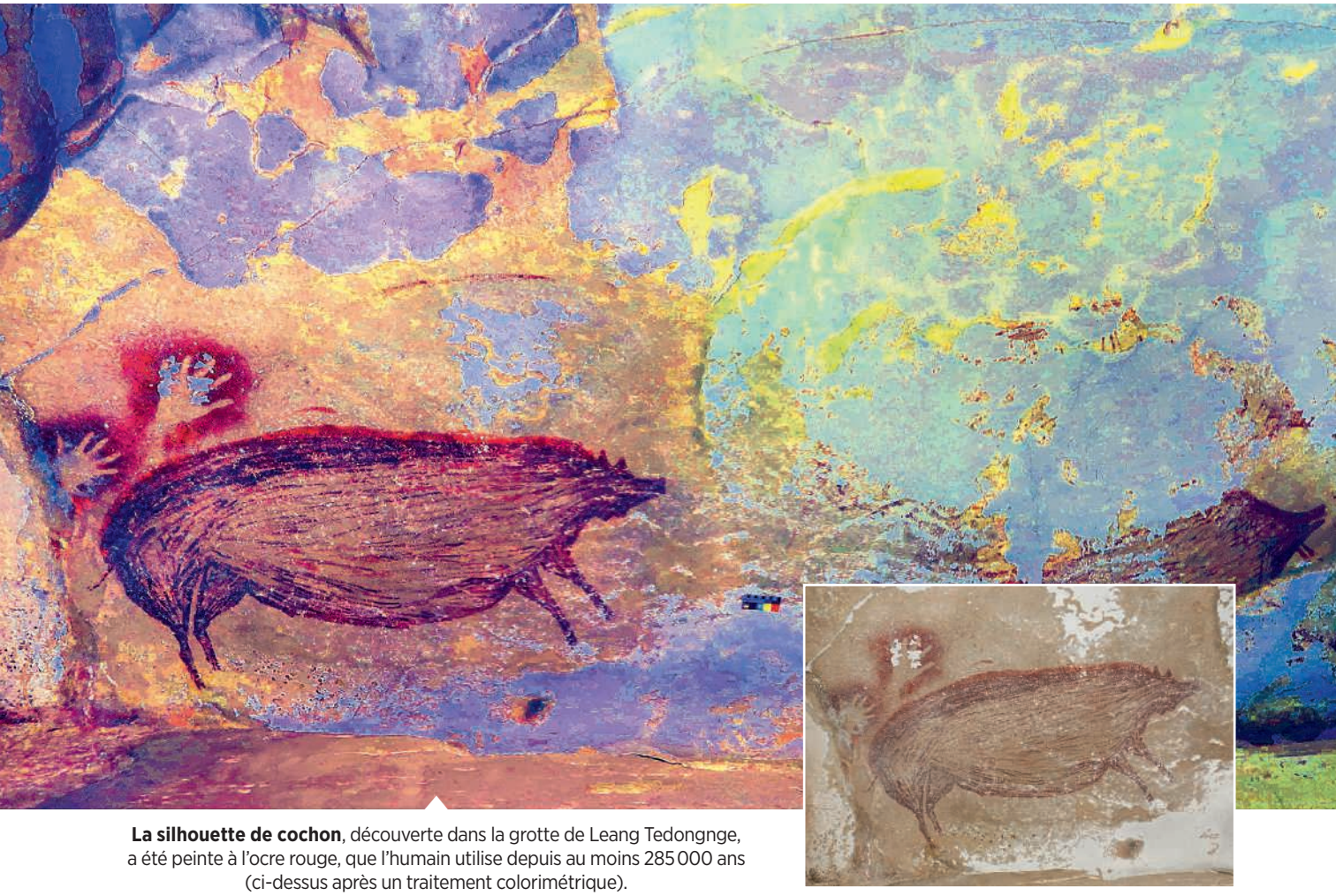
l'âge estimé de la peinture de cochon découverte dans la grotte de Leang Tedongnge, sur l'île indonésienne de Sulawesi.

Ce n'est pas la première fois que cette contrée dévoile une tradition d'art préhistorique plurimillénaire. Déjà, en décembre 2019, parmi les 300 abris décorés dissimulés dans les massifs karstiques de cette île à l'est de Bornéo, un buffle semblant chassé par des créatures hybrides, mi-humaines, mi-animales (thérianthropes), avait été décrit par cette même équipe dans la grotte de Leang Bulu Sipong 4 sur le plateau de Maros-Pangkep, à l'extrême sud-ouest de Sulawesi. Dans cette fresque cynégétique, présentant peut-être une embuscade, huit personnages porteurs de lances et de filets semblent vouloir s'approcher d'un anoa (appellation locale du buffle nain originaire de Sulawesi). Datées de -43 900 ans, ces images primitives déplaçaient déjà en Asie des réalisations que l'on croyait être le seul apanage de l'Europe occidentale, longtemps présumée détenir les plus archaïques de ces traditions graphiques.

De nombreuses interrogations sur l'« origine de l'art »

Dès le XIXe siècle, c'est en effet en Europe, et plus particulièrement en France et en Espagne, qu'ont été explorées des cavités ornées de véritables chefs-d'œuvre. À l'instar des taureaux d'Altamira (Espagne) en 1879, ou encore de Lascaux, « la chapelle Sixtine de l'art pariétal », découverte en 1940. Y explosaient des mises en scène polychromes réalisées entre -15 000 et -20 000 ans pour la première grotte, et il y a 23 000 ans pour la seconde.

Mais c'est surtout en 1994 que fut annoncée l'une des plus spectaculaires trouvailles du XXe siècle. Trois spéléologues, Jean-Marie Chauvet, Éliette Brunel et Christian Hillaire, avaient mis au jour du côté de Vallon-Pont-d'Arc, en Ardèche, celle qui porte désormais le nom de grotte Chauvet-Pont d'Arc. Elle abrite pas moins d'un millier de repré-



La silhouette de cochon, découverte dans la grotte de Leang Tedongnge, a été peinte à l'ocre rouge, que l'humain utilise depuis au moins 285 000 ans (ci-dessus après un traitement colorimétrique).

AA OKTAVIANA - MAXIME AUBERT

sentations, dont la moitié animales, un bestiaire de félins, de chevaux, de mammouths autant que de rhinocéros, ou encore un crâne d'ours laissant supposer un culte dédié à cet ancestral habitant de la caverne. Les datations révélaient un âge de 37 000 ans pour ces œuvres de l'aurignacien, la première civilisation de *sapiens* arrivée en Europe occidentale.

Une ancienneté âprement discutée malgré la cinquantaine de datations fournies par les équipes internationales d'archéologues qui y ont travaillé. L'art préhistorique est en effet une discipline où s'affrontent souvent les experts car elle touche directement à la question de « l'origine de l'art » paléolithique et de son universalité. De ce moment initial, cette aube où des hommes ont « créé ». Et de ce fait, c'est un domaine étroitement lié au développement cognitif des humains. Or les interrogations continuent d'être nombreuses. Y compris autour de la définition même du terme « art », un concept très ambigu qui ne fait pas consensus. D'autant que l'attribution exclusive de cette activité à *Homo sapiens*, et donc aux humains modernes, a été remise en cause ces dernières années. Des discussions ont ainsi été récemment relancées après l'identification de taches d'ocre rouge vieilles de 65 000 ans localisées dans la grotte d'Ardales, en Espagne, et attribuées à des néandertaliens. Cette

L'attribution exclusive de l'activité artistique à « Homo sapiens » a été remise en cause ces dernières années

découverte non seulement repousse de plusieurs millénaires l'âge des plus antiques réalisations picturales humaines, mais indique que celles-ci auraient pu avoir été produites par notre plus proche cousin.

Quantité d'îles à l'est de de Sulawesi restent à explorer

Mais pour l'heure, les peintures préhistoriques de Sulawesi avec leurs 45 500 ans d'âge restent considérées comme les plus anciennes connues. Elles suggèrent en particulier qu'au cours du pléistocène, les humains ont indépendamment généré de l'art figuratif aux alentours de -40 000 ans aux deux extrémités de l'Eurasie, l'espace occupé par les premiers humains modernes sortis d'Afrique il y a plus de 65 000 ans. Et pour les anthropologues, la question est désormais plutôt de déterminer si l'art rupestre faisait partie intégrante des « bagages » et du répertoire culturel des premières populations humaines modernes à avoir atteint l'Asie du Sud-Est ; de même que concernant ces îles indonésiennes, si les artistes auteurs des peintures étaient des *Homo sapiens* ou les membres d'une autre espèce humaine éteinte. Aucun vestige osseux lié aux auteurs de ces productions graphiques n'a pour l'instant été retrouvé. Ces figures pourraient néanmoins être associées à un groupe d'humains modernes ayant migré en Australie il y a 65 000 ans.

D'autres trouvailles déterminantes pourraient être annoncées, car quantité d'îles à l'est de Sulawesi, comme ailleurs dans le monde, demeurent toujours inexplorées. Après tout, l'humanité utilise l'ocre rouge depuis au moins 285 000 ans ! Mais il faut faire vite. Dans un article publié en mai 2021, les inventeurs [nom donné aux personnes ayant découvert et exploré une grotte pour la première fois] des œuvres rupestres de Sulawesi s'inquiétaient de l'accélération de la détérioration des sites préhistoriques des zones tropicales équatoriales, en raison de la multiplication des sécheresses induites par le changement climatique. ■

Bernadette Arnaud
@NarudaaArnaud

VERBATIM

MAXIME AUBERT
PRÉHISTORIEN À L'UNIVERSITÉ GRIFFITH, BRISBANE (AUSTRALIE)

L'art pariétal aurait une origine plus ancienne encore

« Je ne sais pas si l'Indonésie est le berceau de l'art pariétal mais les dernières découvertes nous portent à croire que cet art, autant en Asie qu'en Europe, a probablement une origine plus ancienne et possiblement située en Afrique. Des fresques de Leang Bulu Sipong 4 à celles de Leang Tedongnge, toutes les figures découvertes en Indonésie ont donné des âges fort reculés. Et la totalité des œuvres rupestres que nous y avons datées jusqu'à présent remontent au pléistocène [soit il y a plus de 12 000 ans]. Par ailleurs, les fouilles archéologiques menées à Sulawesi (dans les cavités comportant des peintures préhistoriques) ont dévoilé des niveaux d'occupation contemporains aux fresques. Nous y avons rencontré de grandes quantités d'ocre rouge ainsi que des vestiges d'objets façonnés par les habitants de l'époque, à l'instar de fragments de colliers ou de pendentifs. Ainsi, l'antiquité de ces installations anthropiques confirme l'âge des figures présentes sur les parois. Actuellement, nous poursuivons nos investigations sur l'île de Sulawesi ainsi qu'à Bornéo, en explorant également de nouveaux sites dans le secteur de Misool (province indonésienne de Papouasie occidentale) et en Nouvelle-Guinée. » ■

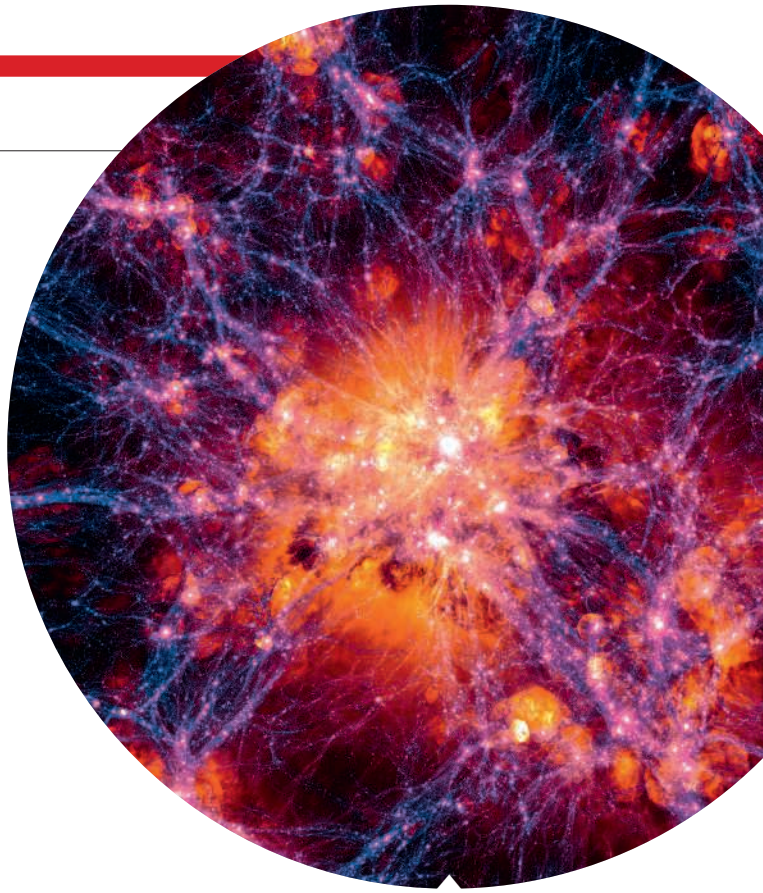
JUSTIN MOTT

Maxime Aubert a participé à la datation de la fresque du cochon (ici dans une des grottes de Sulawesi).

2

On a trouvé la matière cachée !

Une partie de la matière ordinaire demeurait insaisissable depuis des décennies. Une équipe de chercheurs est parvenue à la repérer, sous forme de gaz, au sein des filaments galactiques de notre univers.



THE ILLUSTRIS COLLABORATION

Sur cette simulation à grande échelle de l'Univers, on distingue les amas de galaxies reliés par des filaments, où se cache le gaz manquant.

Certes, ce n'est pas encore la matière noire, mais débusquer la matière cachée ne fut pas chose facile pour autant. Loin de là. Si l'on ignore encore la nature de la première, celle de la matière cachée était en revanche connue : essentiellement du gaz d'hydrogène et d'hélium. Issu du Big Bang, ce gaz est visible lorsqu'on observe l'Univers à ses balbutiements. Mais il semble s'être évanoui au fil du temps jusqu'à ne représenter aujourd'hui que 60 % du total initial.

Depuis environ deux décennies, les astrophysiciens soupçonnaient sa présence au sein des filaments galactiques. Ces structures gigantesques, pouvant atteindre 300 millions d'années-lumière (la Voie lactée ne fait « que » 100 000 années-lumière de diamètre), sont composées de galaxies et relient des amas de galaxies. Les simulations numériques d'évolution de l'Univers indiquent que le gaz qui ne s'est pas concentré dans les amas a pu finir dans ces filaments. Sa température théorique, entre 100 000 et 10 millions de degrés, devrait le faire rayonner dans le domaine des rayons X. Mais le gaz est tellement dilué que ce rayonnement reste très ténu. D'où l'astuce trouvée par Nabila Aghanim et son équipe de l'institut d'astrophysique spatiale d'Orsay (Essonne) pour le faire ressortir sur les clichés. *« Nous avons cherché cette émission en compilant des milliers de prises de vue du télescope allemand Rosat* [désorbité en 2011] *correspondant aux régions de l'Univers où l'on trouve des filaments. Nous avons ainsi observé l'émission X moyenne de plus de 15 000 d'entre eux »*, nous confiait-elle en janvier 2021. En additionnant les images, la faible lueur du gaz a fini par ressortir sur une tranche d'univers située entre 2,6 et 7,1 milliards d'années-lumière. La matière cachée ne l'est plus !

40 %

Le pourcentage d'hydrogène et d'hélium qui semble s'être évanoui depuis le Big Bang, il y a environ 13,8 milliards d'années.

Mais la chasse n'est pas terminée pour autant. *« Il faut faire le décompte précis de cette matière, ce qui veut dire la traquer partout où elle peut se cacher,* explique Nabila Aghanim. *Nous la cherchons maintenant dans des filaments 100 fois plus petits, reliant des paires d'amas de galaxies ou des superamas. Des premiers résultats indiquaient qu'ils pourraient contenir entre 20 et 40 % de la matière manquante. C'est une fourchette assez large qui repose sur une détection indirecte du gaz. Pour la réduire, nous essayons de la voir directement, comme dans les filaments longs, en empilant des images de ces super-amas. Mais c'est difficile, car les caractéristiques des filaments courts sont différentes, en termes de températures, de densité… Nous avons donc recours à des simulations numériques pour mieux comprendre les filaments et interpréter les données plus finement. »* Le travail des chercheurs n'est donc pas une simple extension de ce qu'ils ont fait grâce aux données de Rosat. *« Nous souhaiterions en utiliser de meilleure qualité que celles fournies par le télescope allemand, comme celles d'eRosita* [lancé en 2019], *mais nous ne savons pas encore très bien si nous pourrons le faire comme nous le souhaitons. »* L'astrophysicienne espère fournir ces nouveaux résultats en 2022. ■

Fabrice Nicot @fnicot07

3

Le berceau des chevaux domestiques a été identifié

La plus grande analyse d'ADN ancien jamais menée sur des équidés a permis d'établir que la domestication des premiers ancêtres de nos chevaux modernes s'est produite dans le nord du Caucase il y a environ 4200 ans.

Faire la une de *Nature* s'apparente à une consécration pour un chercheur. Aussi, quand la prestigieuse revue scientifique britannique met en couverture de son édition du 28 octobre dernier l'annonce de la découverte des *« origines génétiques des chevaux domestiques modernes »*, le paléogénéticien français Ludovic Orlando, responsable de l'équipe internationale à l'origine de cette publication, ne peut s'empêcher d'exprimer son enthousiasme. Car cela faisait dix ans que ce spécialiste de l'analyse de l'ADN ancien œuvrait à la résolution de ce mystère. Un bonheur à la mesure de l'enjeu scientifique : le débat autour de cette question faisait rage depuis plusieurs dizaines d'années. Au cours de ces décennies, les chercheurs ont envisagé différents berceaux pour les chevaux domestiques modernes : l'Anatolie (Turquie), la péninsule Ibérique, les steppes d'Asie centrale ou encore la Sibérie. Des fausses pistes, selon Ludovic Orlando, qui s'était lui-même penché, il y a quelques années, sur le site de Botaï, en Asie centrale, dans le Kazakhs-

Le profil génétique des chevaux domestiqués a remplacé toutes les lignées locales, de l'Atlantique à la Mongolie, entre -1500 et -1000 ans.

LUDOVIC ORLANDO.

tan actuel. « *Il s'agit plutôt d'un territoire compris entre les contreforts du Don et de la Volga, deux fleuves situés dans les steppes occidentales de l'Eurasie, entre la mer Caspienne et la mer Noire, au nord du Caucase* » *(voir la carte ci-contre)*, résume le directeur du centre d'anthropologie et de génomique de Toulouse, à l'université Paul-Sabatier. Voilà pour la localisation géographique, que le chercheur et son équipe ont déterminée grâce à la plus grande analyse d'ADN ancien jamais menée sur des équidés. Les scientifiques ont en effet séquencé le génome de 273 chevaux anciens, provenant de matériel osseux (oreille interne, morceaux de tibia ou de fémur) ou dentaire calcifié. Ces fossiles ont été étudiés de manière à constituer le corpus de données le plus complet possible, tant sur le plan chronologique que géographique. Ils couvraient ainsi une période allant de -50 250 à -202 ans et provenaient d'une centaine de sites archéologiques répartis dans toute l'Eurasie, dont les foyers de domestication envisagés jusqu'alors.

BRUNO BOURGEOIS

L'analyse des échantillons a révélé quatre groupes de chevaux dits monophylétiques, c'est-à-dire dérivés d'un même ancêtre commun, et géographiquement définis : une première lignée identifiée dans le nord-est de la Sibérie, ayant vécu entre le Ve millénaire et 129 000 ans avant notre ère ; un deuxième groupe localisé en Europe (de l'Espagne jusqu'à la Scandinavie, la Hongrie et la Pologne), ayant vécu du VIe au IIIe millénaire avant notre ère ; un troisième ensemble regroupant des chevaux présents en Asie centrale du Ve au IIIe millénaire avant notre ère ; enfin, un quatrième groupe rassemblant des chevaux ayant vécu dans les steppes occidentales de l'Eurasie, avant et pendant le IIIe millénaire avant notre ère. En comparant ces différentes lignées avec le génome de chevaux modernes, Ludovic Orlando et ses collègues ont déterminé que les ancêtres des chevaux domestiques modernes sont issus de ce quatrième et dernier groupe.

273
Le nombre de chevaux anciens, provenant d'une centaine de sites et couvrant une période allant de -50 250 à -202 ans, dont le génome a été séquencé.

Ils ont également établi la chronologie de leur expansion. L'histoire débute il y a 4200 ans environ. Le profil génétique de ces chevaux se serait ensuite répandu peu à peu. Autour de -2200 à -2000 ans, on le retrouve en Bohème (Europe centrale), en Anatolie ou encore en Asie centrale, avant qu'il ne remplace toutes les lignées locales d'équidés, de l'Atlantique à la Mongolie, entre -1500 et -1000 ans. Cette diffusion se double d'une augmentation très sensible de cette population de chevaux, d'après les chercheurs. « *Il s'agit d'une explosion démographique soudaine, qui survient très vraisemblablement parce que leur reproduction est contrôlée, qu'elle se produit sous la main des humains* », analyse Ludovic Orlando.

Dos robuste, bonne endurance et docilité

Restait à expliquer les raisons de cet essor. Là encore, les scientifiques ont fait parler l'ADN ancien. En passant au crible leurs données génétiques, ils ont identifié deux variants de gènes surreprésentés chez les ancêtres des chevaux domestiques modernes, par rapport aux lignées de chevaux qu'ils ont supplantées : GSDMC et ZFPM1. « *Le premier gène est impliqué dans l'anatomie dorsale et dans l'expérience de marche. Des études, chez l'humain, ont montré que ces variants augmentent ou réduisent le risque de développer, par exemple, un mal de dos chronique,* détaille Ludovic Orlando. *Nous avons émis l'hypothèse qu'il en était de même chez le cheval et que le variant que nous avons identifié donnait un dos robuste et une bonne endurance.* » Le second gène, lui, est associé, chez la souris, à la réponse agressivité/docilité dans le comportement. Les chercheurs ont donc supposé que le variant porté par l'ancêtre de nos chevaux domestiques modernes augmentait sa docilité.

Si Ludovic Orlando et son groupe se veulent prudents sur ces interprétations, leur conviction d'avoir mis un point final à la question du berceau géographique et temporel du cheval domestique moderne, elle, est forte. « *Notre étude est la plus documentée et la plus précise sur ce sujet,* estime le paléogénéticien. *Nous pouvons dire que nous l'avons trouvé.* » ■ **Vincent Glavieux**

@vglavieux

4

Le repliement des protéines résolu par une IA

L'intelligence artificielle, nouveau graal de la biologie ? C'est ce que suggère le résultat spectaculaire d'Alphafold, l'algorithme de DeepMind qui prédit la forme des protéines. De quoi révolutionner la conception de nouveaux médicaments.

Le visage de la biologie computationnelle n'est plus le même depuis l'avènement du programme Alphafold2. Publié en juillet 2021 dans la revue *Nature*, l'article décrivant cette avancée spectaculaire des chercheurs de Deep Mind, la filiale de Google dédiée à l'intelligence artificielle, a beaucoup été commenté. Le problème posé était le suivant : soit une suite d'acides aminés donnée, quelle forme va prendre la protéine constituée de cet assemblage ? Autrement dit, comment la nature passe-t-elle du plan de montage à une pièce complexe ayant des propriétés particulières ? Les protéines sont des macromolécules présentes dans toutes les cellules produites par le génome d'un organisme : enzymes, hormones, anticorps, protéines fibreuses nombreuses dans les muscles, etc. Lorsque l'une d'elles est synthétisée par la machinerie cellulaire à partir du code génétique, elle prend sa forme définitive en se repliant, conformément aux lois de la physique et de la chimie. Ce repliement aboutit à une configuration stable qui résulte des multiples interactions entre les différents atomes et molécules de la protéine. Si la nature sait s'y prendre, les biologistes ont bien du mal à prédire cette forme stable, qui confère ses propriétés à la protéine. En cause, la combinatoire qui est énorme : une protéine comprend plusieurs dizaines de milliers d'atomes en interaction. « *Typiquement, une protéine contient entre 100 et 300 acides aminés* », explique Krzysztof Fidelis, directeur du Protein Structure Prediction Center à l'université Davies (États-Unis). Avec de tels nombres, le total de protéines potentiel est immense : 20^{300} (soit environ 5×10^{402}, bien plus que toutes les particules de l'Univers). Toutefois, toutes ces combinaisons ne sont pas produites par le génome : on estime qu'un génome d'eucaryote — les organismes dont les cellules ont un noyau — n'est capable de synthétiser que quelques dizaines de milliers de protéines différentes.

20^{300}

Le nombre potentiel de protéines, soit bien plus que toutes les particules de l'Univers.

« *Au début des années 1970, le prix Nobel de chimie américain Christian Anfinsen avait formulé le problème du repliement des protéines de façon élégante : la conformation d'une protéine — la façon dont elle se replie — est unique et dépend essentiellement de sa séquence d'acides aminés* », raconte Krzysztof Fidelis. Mais la résolution de ce problème d'énoncé simple allait se révéler redoutable, car les interactions entre atomes sont très nombreuses, de sorte que les simulations numériques étaient encore, après plusieurs décennies de travaux, loin du compte.

Une compétition internationale pour modéliser les protéines

Même en utilisant les plus puissants ordinateurs, ces simulations dites *ab initio*, où l'on part des éléments constitutifs pour aboutir à la conformation finale stable, ne donnent pas de bons résultats. « *La difficulté est que ces calculs nécessitent de connaître toutes les interactions qui s'exercent entre les entités de la molécule à partir des principes physiques et chimiques fondamentaux. Or, ces molécules sont tellement grandes que l'on ne peut faire que des moyennes assez grossières. Ainsi, il paraît vain de vouloir tout prédire de cette manière* », explique Sergei Grudinin, chercheur au CNRS, à Grenoble.

L'essor de l'intelligence artificielle a changé la donne. Petit à petit, les méthodes d'apprentissage statistique

C'est la forme de la protéine qui détermine ses propriétés. Ici, la protéine Q8W3K0, qui permet à certaines plantes de résister aux maladies.

DEEPMIND

— le *machine learning* — sont intégrées aux algorithmes. Par exemple, avec une équipe internationale, Sergei Grudinin met au point des algorithmes de simulation de modélisation des systèmes macromoléculaires qui commencent à utiliser l'apprentissage automatique. En 2018, lors de la compétition CASP13, qui permet aux scientifiques de comparer leurs résultats de prédiction, son équipe a terminé première dans une des catégories. C'est aussi lors de CASP13 que les chercheurs de DeepMind sont entrés dans la course. Leurs résultats impressionnent d'emblée : le programme qu'ils ont mis au point et baptisé AlphaFold parvient à prédire la structure des 43 protéines cibles avec une précision 15 à 20 % supérieure à celle de la centaine d'autres équipes du monde entier qui participaient à la compétition.

En novembre 2020, lors de la dernière compétition CASP14, leur programme amélioré — AlphaFold2 — est parvenu à prédire plusieurs formes de protéines aussi bien que ce que l'on peut faire expérimentalement en laboratoire lorsqu'on mesure la forme d'une protéine existante. *« Le problème de repliement des protéines tel qu'énoncé par Christian Anfinsen était dès lors résolu »*, juge Krzysztof Fidelis. Un résultat d'autant plus étonnant que la plupart des autres équipes — universitaires — avaient également incorporé de l'apprentissage statistique dans leurs programmes.

Pour Krzysztof Fidelis, ce succès fait écho à celui que les chercheurs de DeepMind avaient obtenu en 2016 avec le jeu de go, parvenant à créer un logiciel imbattable par les humains, alors que l'on pensait cet objectif lointain : *« Plusieurs ingrédients expliquent selon*

« Le champ des possibles devient immense pour la conception de protéines artificielles »

Krzysztof Fidelis, directeur du Protein Structure Prediction Center à l'université Davies, aux États-Unis

VERBATIM

ÉLODIE LAINE MAÎTRESSE DE CONFÉRENCES À SORBONNE UNIVERSITÉ, AU LABORATOIRE DE BIOLOGIE COMPUTATIONNELLE ET QUANTITATIVE

« La vague déclenchée par l'exploit d'Alphafold n'est pas retombée »

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

"Lorsque l'article décrivant le système AlphaFold2 est sorti, en juillet 2021, nous l'avons décortiqué avec des collègues lors de séances de discussion pour parler de l'architecture du réseau de neurones et des algorithmes utilisés. Que peut-on faire avec ces modèles et comment exploiter les modèles 3D prédits? Beaucoup d'efforts ont également été faits par le monde académique pour utiliser Alphafold2 afin de prédire la forme des assemblages de protéines (les complexes). Et finalement, en octobre 2021, l'équipe de chercheurs de DeepMind a sorti une prépublication présentant les résultats d'une nouvelle version du réseau de neurones baptisé AlphaFold-Multimer, consacrée précisément à la prédiction de ces assemblages. Les résultats de cet article montrent qu'AlphaFold-Multimer, légèrement modifié et surtout réentraîné sur les complexes, fait mieux que « l'état de l'art » et aussi que les tentatives du monde académique qui avaient juste « détourné » AlphaFold2 pour la prédiction de complexes, sans réentraînement. Par ailleurs, Demis Hassabis, l'un des fondateurs de DeepMind, a annoncé en novembre dernier la création d'une start-up, baptisée Isomorphic Labs, dont l'objectif affiché est de révolutionner le processus de la mise au point de nouveaux médicaments (drug discovery), grâce au transfert de connaissances issues de DeepMind. Les choses bougent vite et la vague déclenchée par l'arrivée d'Alphafold n'est pas encore retombée."

moi ce succès incontestable : la disponibilité de nombreuses données de structures et de séquences protéiques — ce qui permet d'entraîner les modèles d'apprentissage efficacement —, une puissance de calcul importante, qui n'est pas facilement accessible par des laboratoires académiques, et des collaborations avec les meilleurs chercheurs. La question est aussi de bien comprendre ce qui, avec l'apprentissage automatique, nous permet d'aboutir à des résultats aussi bons. Nous pourrons alors appliquer ce type de compréhension avec la physique que nous connaissons, pour parvenir, j'en suis persuadé, à résoudre le problème de repliement des protéines sur un ordinateur standard, autrement dit avec une faible puissance de calcul. »

Des résultats prometteurs sur la biologie du Sras-CoV-2

Sur le plan fondamental, les chercheurs de DeepMind considèrent cette recherche comme un tremplin vers l'attaque d'autres problèmes complexes, telles les interactions avec l'ARN et l'ADN. L'objectif ultime reste toutefois la conception de nouvelles protéines avec des fonctions sur mesure. *« Avec la combinatoire en jeu — des protéines de 300 résidus de long choisis parmi 20 acides aminés —, le champ des possibles est immense pour la conception de protéines artificielles : il y a un grand nombre de séquences que la nature n'a pas explorées »*, explique Krzysztof Fidelis.
En attendant, depuis juillet dernier, des centaines de milliers d'utilisateurs ont visité la base de données de protéines AlphaFold mise à disposition par DeepMind. Parmi les résultats prometteurs déjà publiés par des groupes universitaires : l'étude de l'antiobiorésistance ou la compréhension de la biologie du Sras-CoV-2. Et DeepMind projette d'ajouter 100 millions de structures de protéines dans la base de données ouverte à la communauté. ■

Philippe Pajot @philpaj

5

L'optogénétique rend la vue à un aveugle

Un traitement innovant mené par une équipe française parvient à sensibiliser certaines cellules rétiniennes à la lumière. Une première mondiale.

Bien des années après l'avoir perdue, un homme de 58 ans a recouvré partiellement la vue. Suffisamment pour être à nouveau capable de détecter la présence d'objets, de les manipuler ou encore reconnaître un passage piéton. Une première mondiale faisant tomber un mur qui semblait infranchissable pour la restauration de la vision dans la dégénérescence rétinienne. En effet, le patient inclus dans cet essai clinique publié dans *Nature Medicin*e en mai dernier s'était vu diagnostiquer à l'âge de 18 ans une rétintite pigmentaire, maladie génétique qui détruit peu à peu les neurones de la rétine dits photorécepteurs, sensibles à la lumière. Concrètement, il a été progressivement plongé dans le noir.

Jusqu'à ce qu'une équipe internationale dirigée par le Pr José-Alain Sahel de l'Institut de la vision à Paris mette au point un traitement expérimental pour sensibiliser certaines cellules rétiniennes à la lumière. Elle a utilisé pour cela l'optogénétique, une technique née au début des années 2000 qui consiste à modifier génétiquement des cellules afin qu'elles produisent une protéine photosensible. Lorsque celle-ci reçoit une stimulation lumineuse dans une certaine longueur d'onde, elle génère un signal électrique. Les médecins ont ainsi ciblé des neurones non photorécepteurs mais en bon état dans la rétine du patient pour les rendre sensibles à la lumière. « *On cherche à faire exprimer dans ces neurones, qui ne sont pas les neurones visuels, une protéine qui est sensible à la lumière, et qui déclenche un courant électrique* », résume José-Alain Sahel. La protéine choisie, ChrimsonR, est codée par des gènes provenant d'algues vertes lumineuses. L'injection du vecteur viral porteur de ces gènes directement dans les yeux du patient a eu lieu début 2019 à l'hôpital des Quinze-Vingts, à Paris. Et six mois plus tard, les neurones rétiniens ciblés se sont mis à produire la protéine espérée, qu'il ne restait plus qu'à stimuler.

Pour cela, les chercheurs ont mis au point un dispositif de pointe : une paire de lunettes équipée, d'une part, de caméras mesurant les variations d'intensité lumineuse de l'environnement et, d'autre part, d'un projecteur retransmettant l'image à l'œil selon une longueur d'onde précise (590 nanomètres), associée à une lumière jaune orangé adaptée à ChrimsonR.

SAHEL ET AL., NATURE 2021

Parmi les tests pratiqués plusieurs mois après le traitement, le patient, équipé de lunettes et d'électrodes, devait indiquer la présence d'un gobelet sur la table.

Un possible espoir pour soigner la DMLA

Le patient français a suivi trois mois de rééducation avant que son cerveau ne parvienne à traiter ce nouveau type d'informations visuelles. « *Nous avons testé la fonction visuelle du patient en situation réelle, c'est-à-dire en reproduisant par exemple une rue, un bureau et une maison en laboratoire. Il rapportait qu'il voyait les bandes blanches des passages piétons et qu'il était capable de voir sa tête bouger dans un miroir* », décrit José-Alain Sahel. Aujourd'hui, les encombrantes lunettes lui restent indispensables pour profiter de ces perceptions visuelles mais les ingénieurs travaillent sur des modèles plus fins. Il ne devrait en tout cas pas rester un cas isolé bien longtemps, puisqu'une quinzaine d'autres patients ont déjà été soumis au même protocole.

Alors que 2 millions de personnes sont touchées dans le monde par une forme génétique de rétinite pigmentaire et sont donc potentiellement éligibles à un tel traitement, le protocole pourrait être exploité pour d'autres pathologies de la rétine comme la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) — première cause de malvoyance en France après 50 ans — voire la rétinopathie provoquée par les complications du diabète. ■ **Hugo Jalinière** @HugoJaliniere

Les vedettes du règne animal en 2021

Le plus petit reptile du monde, un survivant marin à huit bras, un rapace qu'on croyait disparu… Voici un panorama des découvertes marquantes de l'année.

Par Loïc Chauveau @LoicChauveau **et Anne-Sophie Tassart** @TassartAS

Orange est la nouvelle chauve-souris

Myotis nimbaensis est une espèce de chauve-souris découverte dans la chaîne montagneuse du Nimba, en Guinée. Inconnue jusqu'ici, elle a la particularité d'être entièrement orange.

Un insecte nommé d'après le coronavirus

Décrit durant le confinement, cet insecte a été nommé *Potamophylax coronavirus* en référence à la « pandémie silencieuse » qui menace les organismes d'eau douce au Kosovo : pollution, tourisme, déforestation.

Des grenouilles zombies sorties de terre

Les herpétologistes ont baptisé « zombie » cette nouvelle grenouille du genre *Synapturanus*, en écho à leur propre apparence après avoir creusé le sol des forêts d'Amazonie où elle vit enfouie !

Voici le plus petit reptile du monde

22,5 mm en comptant la queue, c'est la taille de *Brookesia nana*, le plus petit reptile du monde. Un couple de ce proche cousin des caméléons a été découvert dans les forêts du nord de Madagascar.

BAT CONSERVATION INTERNATIONAL / HALILIBRAHIM ET AL. / ANTOINE FOUQUET / FRANK GLAW / ZOOLOGISCHE STAATSSAMMLUNG MUNCHEN / AFP

JAY BLACK/UNIVERSITY OF MELBOURNE / ANDY BOYCE / ALEXANDER ZIEGLER

La dernière ophiure à huit bras

Découvert à 500 m de profondeur au large de la Nouvelle-Calédonie, *Ophiojura exbodi* est le dernier représentant d'un genre à huit bras d'ophiures — une classe d'échinodermes proche des étoiles de mer — qui en ont généralement cinq ou six.

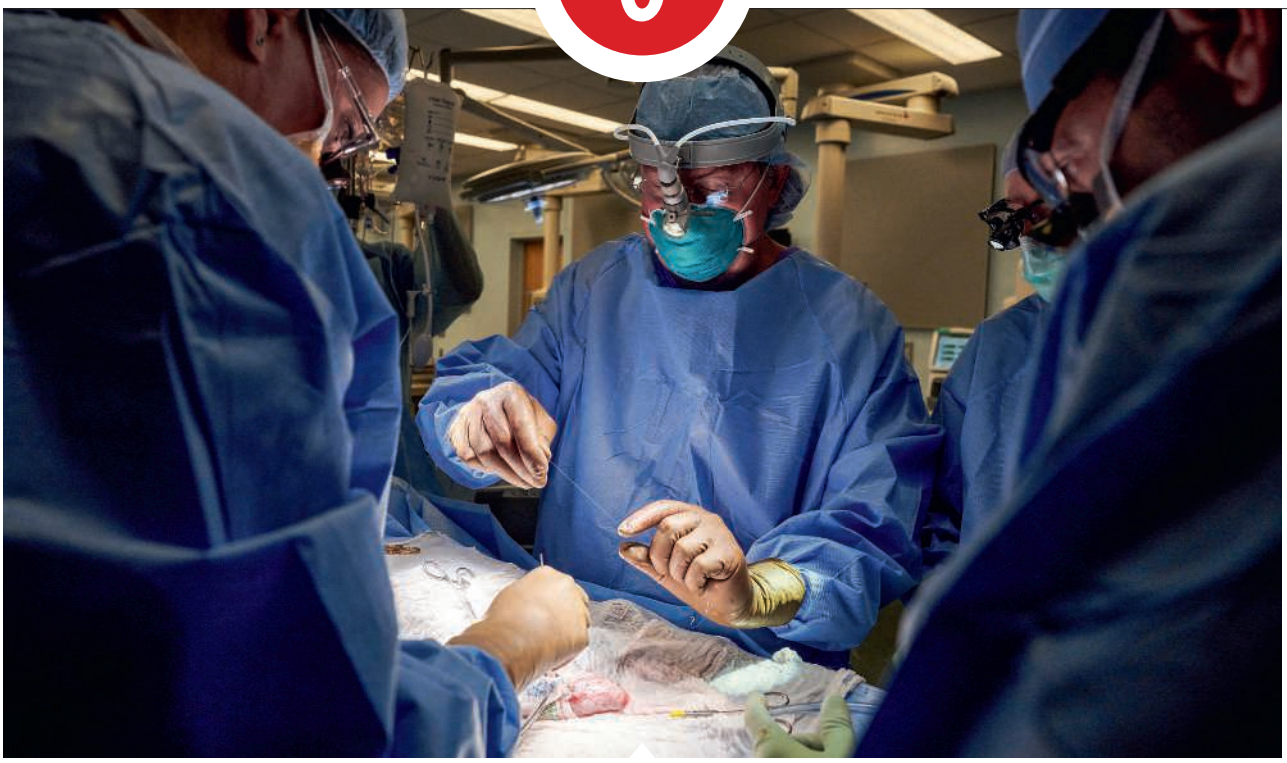
Un hibou redécouvert après 120 ans

Le petit-duc Radjah de Bornéo n'avait plus été observé vivant dans la nature depuis la fin du XIXe siècle. Il a été photographié par un chercheur américain dans une forêt du mont Kinabalu, en Malaisie.

Un céphalopode décrit sans être disséqué

Grimpoteuthis imperator est une espèce nouvellement décrite de céphalopode. Sa particularité : pour l'étudier, les chercheurs n'ont pas utilisé de méthodes invasives, seulement de l'imagerie.

6



JOE CARROTTA FOR NYU LANGONE HEALTH/REUTERS

Les chirurgiens new-yorkais ont greffé le rein de cochon sur un patient en état de mort cérébrale.

Première greffe réussie du cochon vers l'humain

Le rein de l'animal n'a pas été rejeté par le corps du patient et a fonctionné sans anomalie. Cet essai expérimental offre de nouveaux espoirs face à la pénurie de greffons humains.

L'espoir de greffer des organes animaux en toute sécurité pour pallier la pénurie de donneurs n'a jamais été aussi grand : pour la première fois une greffe d'un rein de cochon a été effectuée sur un être humain sans que celui-ci ne rejette l'organe. L'exploit a été réalisé le 19 octobre dernier par l'équipe de chirurgiens de Robert Montgomery, du centre de santé Langone de l'université de New York (États-Unis). Une première mondiale réalisée dans le cadre d'un essai expérimental sur une personne en état de mort cérébrale, dont le maintien en vie devait être arrêté. Avant cela, avec l'accord de la famille, les chirurgiens ont greffé le rein de cochon aux vaisseaux sanguins du patient, mais ont gardé l'organe à l'extérieur du corps pour en observer le fonctionnement durant trois jours. Résultat : non seulement le rein n'a pas été rejeté par le corps du patient, mais il a fonctionné sans anomalie, en produisant une quantité normale d'urine et en réduisant les niveaux sanguins de créatinine, un produit de la déshydra-

OUTIL

Un modèle pour prédire les risques de rejet

Après toute greffe, le système immunitaire du patient reconnaît le nouvel organe comme étranger à l'organisme et l'attaque, ce qui peut entraîner la perte du greffon. Et malgré des avancées pour éviter ces rejets grâce à des traitements qui baissent la réponse immunitaire du receveur, environ 10 % des greffons implantés en France ne survivent pas la première année. Afin de prédire ces rejets et ainsi les éviter, l'équipe d'Alexandre Loupy au Centre de recherche translationnelle sur la transplantation d'organes de Paris (Inserm, université de Paris) a mis au point un modèle qui estime ce risque pour les greffes de rein, grâce aux données de santé de plus de 13 000 patients. *« Si on prédit que le greffon n'a que 48 % de chances de survie à cinq ans après l'évaluation du risque, les cliniciens pourront, selon le patient et la situation, ajuster le traitement, s'orienter vers un suivi plus rapproché ou faire une biopsie de façon précoce afin de rallonger la survie du greffon, et par extension celle du patient,* explique Marc Raynaud, premier auteur de l'article présentant ce nouvel outil pour les cliniciens, publié le 27 octobre dernier dans *The Lancet Digital Health*. *Ce modèle pourrait permettre d'augmenter le succès des greffes, mais ce n'est pas pour autant que la pénurie de greffons sera résolue.* »

MARC RAYNAUD

« Les cliniciens pourront, selon le patient et la situation, ajuster le traitement »

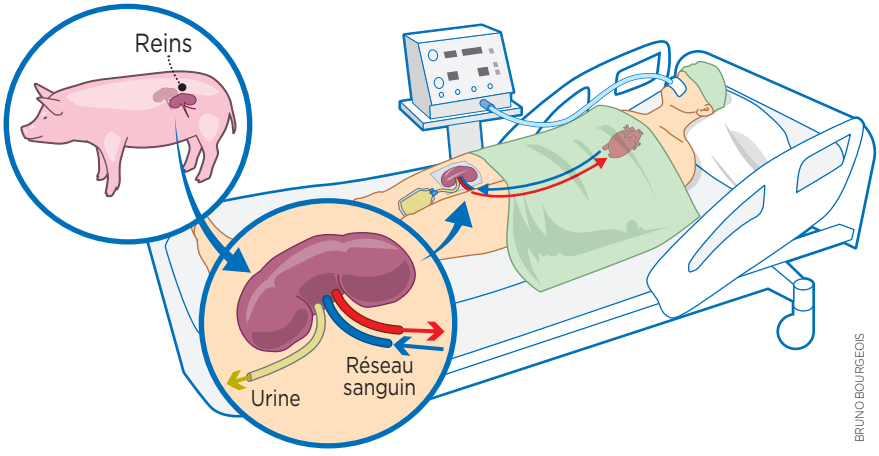
Marc Raynaud, chercheur au centre de recherche translationnelle sur la transplantation d'organes de Paris (Inserm, université de Paris)

tation du muscle qui normalement est éliminé par l'urine.

Avec 3000 interventions réalisées chaque année, la transplantation rénale est la greffe la plus fréquente en France. Cependant, le nombre total de personnes attendant un greffon est bien supérieur. Ceux-ci sont principalement prélevés chez des sujets en état de mort cérébrale. Et la situation est la même pour les autres organes. Aussi, seulement un quart des personnes en attente ont reçu une greffe en 2014, tous organes confondus : 5357 greffes ont été réalisées en France selon l'Inserm, alors qu'il y avait plus de 20 000 personnes en liste d'attente.

Un exploit inédit avec un organe entier

Devant ce manque de greffons disponibles, la recherche explore plusieurs voies. L'une consiste à produire des organes en laboratoire à partir de cellules du patient, ce qui permettrait de supprimer le risque de rejet. Pour cela, des cellules souches sont injectées dans une armature, où elles se divisent et se distinguent en différents types cellulaires. Cette ossature peut être imprimée en 3D ou issue d'un organe d'origine animale auquel on a retiré la totalité des cellules, ne laissant que les protéines formant la structure. Mais pour le moment, cette approche n'a été testée avec succès que pour des tissus très simples, comme du



BRUNO BOURGEOIS

Le rein d'un cochon génétiquement modifié pour être compatible avec les humains a été greffé aux vaisseaux sanguins de la jambe du patient et a produit de l'urine.

cartilage ou des os, les chercheurs ne parvenant pas à reproduire la totalité d'un organe plus grand.
Plutôt que d'imiter la nature, d'autres chercheurs tentent d'utiliser des organes issus d'autres animaux « proches » de l'humain (xénogreffes). En particulier le cochon, qui a une taille et une physiologie semblables à la nôtre et qui est élevé industriellement pour l'alimentation. Mais jusqu'à présent, toutes les tentatives avaient été vaines en raison du rejet immunitaire entraîné par l'organe porcin. Comme en 1993, lorsqu'une patiente de 26 ans atteinte d'hépatite C a reçu un foie de cochon, mais est décédée à peine 34 heures après à cause de lésions cérébrales consécutives au rejet immunitaire. Seuls quelques succès ont été enregistrés avec des petits tissus, comme des valves cardiaques prélevées chez des cochons dès 1965, mais jamais avec un organe entier.
Comment éviter ce rejet ? Les chercheurs ont découvert qu'il est causé en grande partie par une molécule, le galactose-alpha-1,3-galactose (ou α-Gal). Ce sucre est présent dans les organes du porc, alors qu'il est absent chez l'humain, d'où le déclenchement d'une forte réponse immunitaire. Aussi, les chirurgiens new-yorkais ont utilisé un cochon génétiquement modifié pour ne plus produire cette molécule. L'entreprise américaine Revivicor (propriété de United Therapeutics) déclare avoir déjà obtenu une centaine de ces porcins nommés GalSafe. Des donneurs devenus compatibles avec les humains. *« C'est une avancée très importante, d'autant plus qu'on ne peut pas encore faire de reins artificiels »*, affirme Sophie Brouard, directrice de recherche CNRS au Centre de recherche en transplantation et immunologie au CHU de Nantes (Loire-Atlantique), qui n'a pas participé à cette étude. Reste maintenant à entreprendre des essais cliniques pour prouver la sécurité et l'efficacité des xénogreffes au-delà de trois jours. Ils devraient commencer au plus tard dans deux ans selon les chirurgiens de l'université de New York. ■

Nicolas Gutierrez C. @n6g6c

VERBATIM

ROBERT MONTGOMERY

DIRECTEUR DE L'INSTITUT DE TRANSPLANTATION DU CENTRE DE SANTÉ LANGONE DE L'UNIVERSITÉ DE NEW YORK (ÉTATS-UNIS)

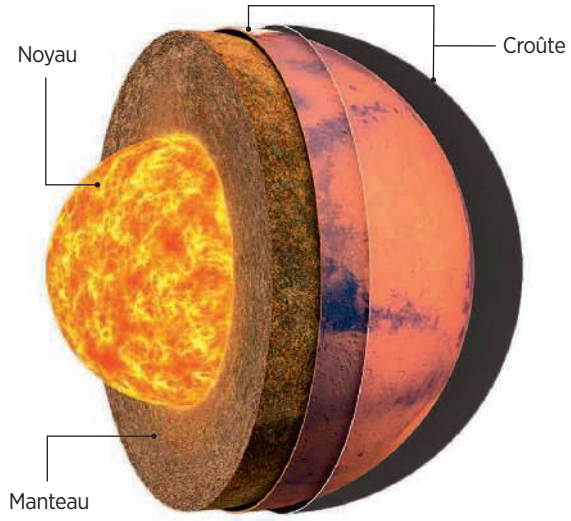
« Une source illimitée d'organes »

AMIR HAMJA/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

« J'avais principalement deux raisons de tenter cette expérience. D'abord, nous n'avons pas suffisamment d'organes pour toutes les personnes en attente de greffe. Environ la moitié décèdent ou deviennent trop malades avant d'en bénéficier. La xénogreffe pourrait être la solution à ce problème, car elle serait une source illimitée d'organes. Ma deuxième raison est plus personnelle. J'ai reçu une greffe de cœur, donc je sais ce que c'est d'attendre un greffon sans savoir s'il arrivera à temps. C'est une expérience très difficile pour le patient et sa famille. Ce fut pour moi une motivation supplémentaire de pouvoir contribuer à résoudre ce problème. GalSafe est un cochon beaucoup plus simple que les autres cochons génétiquement modifiés, car un seul gène est modifié. L'élimination de ce gène cherche à faire tomber la plus grande barrière pour les xénogreffes, à savoir les anticorps naturels que les humains produisent contre l'α-Gal. Le cochon et d'autres mammifères ont encore l'enzyme qui produit ce sucre, mais elle a été perdue au cours de l'évolution et les primates ne la possèdent plus. En revanche, nous avons une quantité très élevée d'anticorps qui ciblent cette molécule, entraînant un rejet hyper-aigu à la suite de l'implantation d'un organe de cochon. Nous avons montré qu'éliminer cette enzyme chez le cochon suffit pour annuler la production de ces anticorps et ainsi éviter cette réponse immunitaire chez l'humain, au moins pendant trois jours. Mais nous ne savons pas encore ce qui adviendra au-delà. » ■

Propos recueillis par N. G. C.

7



DAVID DUCROS/IPGP

Structure interne de Mars (vue d'artiste) révélée par la mission InSight : une croûte stratifiée, un manteau sans discontinuités majeures et un énorme noyau liquide.

L'intérieur de Mars révélé jusqu'au cœur

C'est grâce à un sismomètre de conception française que la structure interne de la planète Rouge commence à être connue.

Les scientifiques ont désormais une vision beaucoup plus précise de ce qui se cache dans les entrailles de la planète Rouge. Grâce au sismomètre français SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) déposé sur Mars fin 2018 par la mission américaine InSight, ils disposent de données fiables et chiffrées sur l'épaisseur de la croûte, la structure du manteau et la taille du noyau. Détaillées en juillet 2021 dans la revue *Science*, elles ont été obtenues en analysant une dizaine de séismes, des « tremblements de Mars ». En particulier en étudiant la manière dont les ondes sismiques sont modifiées et réfléchies par les discontinuités internes de notre voisine. *« Ce que nous avons accompli sur Mars correspond à ce que les sismologues ont réalisé sur notre propre planète au début du XXe siècle »*, se réjouit Philippe Lognonné, chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) et *« père »* de SEIS, bijou technologique développé pendant plus de vingt ans par l'IPGP et le Centre national d'études spatiales. *« Et c'est la première fois que la sismologie dévoile la structure interne d'une autre planète que la Terre »*, relève le géophysicien.

Sous le sismomètre, la croûte apparaît stratifiée. Elle est constituée d'une première couche de 10 km d'épaisseur, très altérée, manifestement par une ancienne circulation d'eau. Une seconde interface a été identifiée à 20 km. Et peut-être aussi une troisième, moins marquée, à 35 km. Dans le manteau, la lithosphère s'étend jusqu'à environ 450 km de profondeur. C'est la partie rigide de la planète, où rien ne bouge, la chaleur se diffusant uniquement par conduction. *« Nous n'avions jusqu'ici aucune indication sur l'épaisseur de la lithosphère martienne »*, rappelle Philippe Lognonné. Or on peut calculer, grâce à elle, le flux de chaleur qui s'échappe encore des entrailles de Mars. Il serait ainsi de trois à cinq fois plus faible que celui de la Terre. Un résultat qui permet d'affiner les modèles d'évolution thermique de la planète Rouge depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années.

Un noyau volumineux, riche en oxygène et en carbone

Mais le résultat le plus important concerne le noyau. Cette partie liquide mesurerait 1 830 km de rayon, soit 53 % du rayon total de la planète. Or ce chiffre se situe dans la fourchette haute des précédentes estimations, comprises entre 1300 et 2000 km. *« Une surprise,* insiste Philippe Lognonné, *qui a d'importantes implications. »* Car un noyau aussi volumineux, par conséquent peu dense, trahit une teneur importante en éléments légers. Contrairement au noyau de la Terre, composé principalement de fer et de nickel, il contiendrait donc aussi des atomes de soufre, de carbone, d'oxygène ou d'hydrogène. Autant d'informations qui permettront de mieux comprendre comment la planète Rouge s'est formée. Et comment elle a perdu, quelques centaines de millions d'années après sa naissance, son champ magnétique protecteur généré par des mouvements de convection à l'intérieur du noyau. *« Toutes ces données forcent les planétologues à revoir leurs calculs,* signale Philippe Lognonné. *Elles aideront à construire de nouveaux modèles expliquant l'évolution de la planète et pourquoi elle a perdu jadis son habitabilité. »* ■ **Franck Daninos** @fdaninos

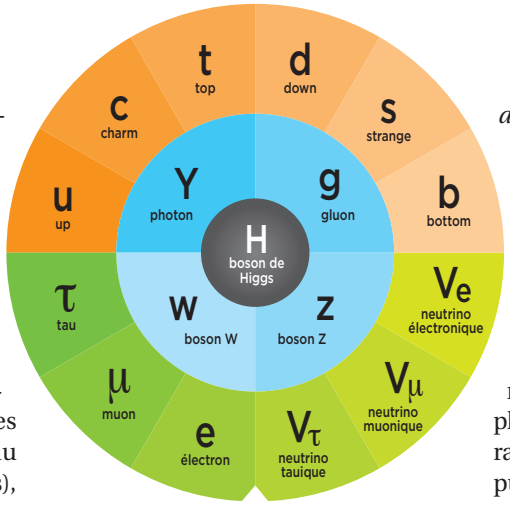
8

Deux particules bousculent la physique fondamentale

Des expériences menées sur le muon et le méson B révéleraient des anomalies incompatibles avec le modèle standard qui décrit le comportement des particules élémentaires. De quoi enthousiasmer les physiciens.

L'année 2021 aura été riche en émotions pour la communauté des physiciens des particules. Deux résultats, publiés au printemps dernier, ont en effet lézardé le modèle standard, ce robuste édifice théorique qui décrit le comportement des particules élémentaires constituant la matière. Le premier concerne le muon, une sorte de cousin de l'électron, 200 fois plus massif que lui. Les équipes de l'expérience Muon g-2 du Fermilab, près de Chicago (États-Unis), ont dévoilé dans la revue *Physical Review Letters* la valeur de son moment magnétique. Cette grandeur traduit la sensibilité du muon à un champ magnétique extérieur. La mesure annoncée ne correspond pas à celle calculée théoriquement. Elle est prise au sérieux car la probabilité d'une erreur n'est que de 1/40 000. D'autant plus qu'elle confirme une autre étude remontant à 2004.

Cet écart intrigue les physiciens : si la valeur diffère de celle prévue, cela signifie que le muon est chahuté par des particules éventuellement inconnues qui peuplent le « vide ». En effet, dans le monde de l'infiniment petit, le vide ne l'est jamais : des particules jaillissent et disparaissent en permanence, comme des vagues à la surface de l'océan. On peut voir le muon comme flottant sur cet océan, sans cesse ballotté par des particules éphémères. *« Pour calculer son moment magnétique, toutes les interactions avec des particules connues issues du vide ont été envisagées,* expliquait en juillet dernier Olcyr Sumensari, physicien théoricien du Laboratoire des deux infinis, à Orsay (Essonne). *Si cet écart entre la théorie et la mesure est confirmé, alors les perturbations viennent nécessairement de particules inconnues.* »



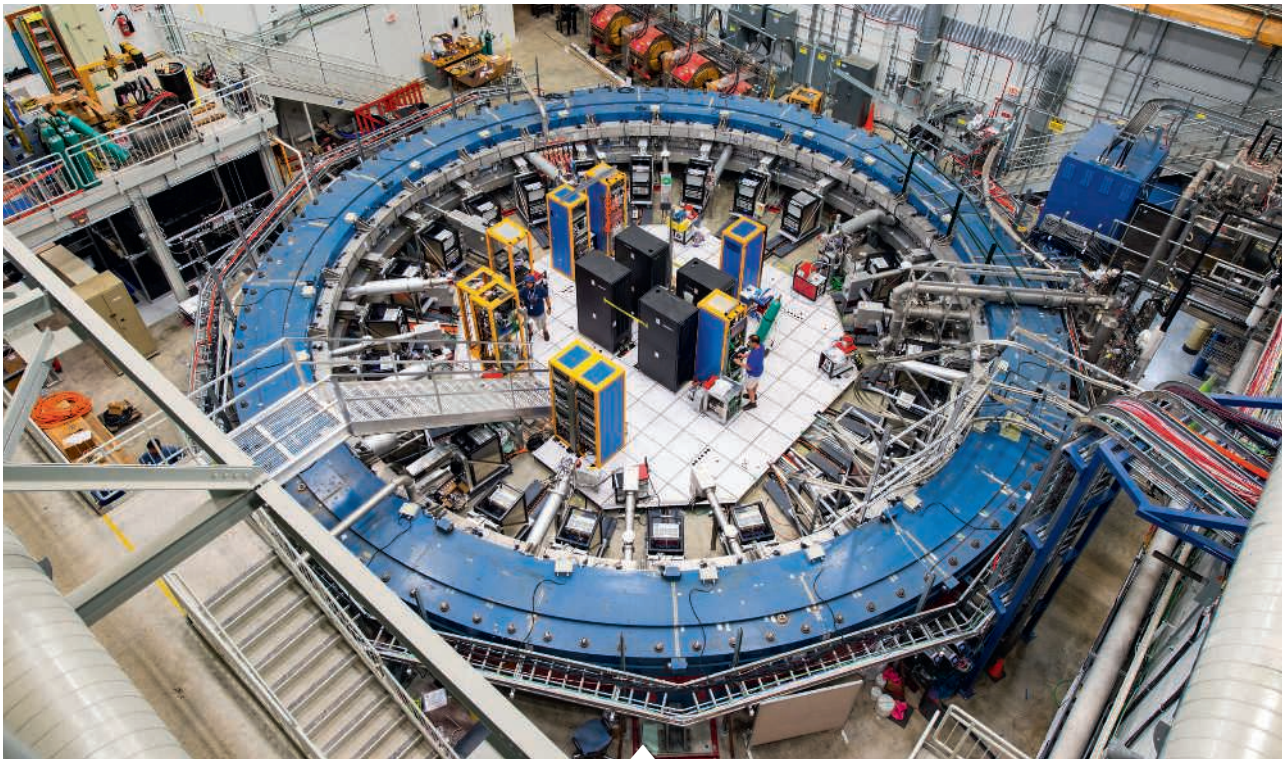
Les particules élémentaires se répartissent en six quarks (orange) et six leptons (vert) qui composent la matière. S'y ajoutent quatre particules qui portent les forces (bleu) et le boson de Higgs qui donne leur masse aux particules.

Avant de conclure à l'existence de nouvelles venues dans le modèle standard, les physiciens concentrent leurs efforts sur le calcul théorique du moment magnétique, très délicat à mener. Ainsi, en même temps que le Fermilab livrait sa mesure expérimentale, une équipe internationale de physiciens, réunie au sein de la collaboration Budapest-Marseille-Wuppertal, publiait une nouvelle valeur théorique, cette fois compatible avec les mesures. Issu d'une approche différente, ce calcul fait toujours l'objet de vérifications. Côté expérimentation, il faudra attendre 2025 pour qu'une nouvelle mesure soit réalisée, au Proton Accelerator Research Complex au Japon.

Une force inconnue n'est pas à exclure

L'autre fissure dans le modèle standard, éventuellement sans lien avec la précédente, provient du méson B. *« Cette particule composée d'un quark et d'un antiquark peut se désintégrer en un cocktail contenant soit une paire électron-positron, soit une paire muon-antimuon,* explique Yasmine Amhis, physicienne des particules à l'univer-

BRUNO BOURGEOIS



REIDAR HAHN, FERMILAB

L'anneau de l'expérience Muon g-2 du Fermilab, près de Chicago (États-Unis), a permis de mesurer la valeur du moment magnétique du muon, une mesure qui s'éloigne de la prédiction théorique.

sité Paris-Saclay (Essonne). *Et cela de manière équiprobable selon la théorie. Or, des mesures réalisées par l'expérience LHCb au LHC* [collisionneur de particules installé au Cern, à Genève] *indiquent que la voie électron-positron serait privilégiée.* » Ce résultat, publié en mars 2021 dans la revue *Nature Physics*, doit cependant être confirmé. Il y a une chance sur mille qu'il soit dû à une fluctuation statistique. Pour être affirmatif, il faut atteindre une chance sur 1,7 million. Le dépouillement des mesures réalisées lors des précédentes collisions organisées au LHC se poursuit.

Il a d'ailleurs débouché sur un autre résultat intéressant, publié en octobre dernier. « *Le méson B peut se désintégrer de plusieurs façons,* explique Yasmine Amhis. *Mais la physique doit être la même, quelles que soient les particules produites. Donc, nous devons retrouver ce déséquilibre avec d'autres modes de désintégration. Et nous l'avons bien retrouvé dans des désintégrations débouchant sur des particules autres que celle de notre précédente publication.* » Avec un bémol toutefois, les modes en question sont plus rares, ce qui débouche sur une incertitude statistique plus grande.

Il n'empêche que ce nouveau résultat va dans le bon sens, celui d'un modèle standard pris en défaut. Selon Olcyr Sumensari, « *le modèle standard peut être vu comme le socle d'une théorie plus fondamentale que nous ne maîtrisons pas encore. Le grand enjeu consiste à trouver les indices expérimentaux qui nous aideraient à la formuler et tous ces résultats sont encourageants.* » Cette nouvelle théorie pourrait déboucher non seulement sur des nouvelles particules, mais pourquoi pas sur une cinquième force fondamentale ! Le LHC, qui va redémarrer en mars prochain, est plus que jamais l'outil très attendu pour continuer à tester le modèle standard. ■ **Fabrice Nicot** @fnicot07

OLCYR SUMENSARI

« Le modèle standard peut être vu comme le socle d'une théorie plus fondamentale que nous ne maîtrisons pas encore »

Olcyr Sumensari, physicien théoricien du Laboratoire des deux infinis, à Orsay (Essonne)

9

La famille des trous noirs au complet

Un trou noir de masse intermédiaire a enfin été observé. Un exploit car de tels objets sont trop isolés pour avoir suffisamment de matière à absorber et devenir ainsi visibles.

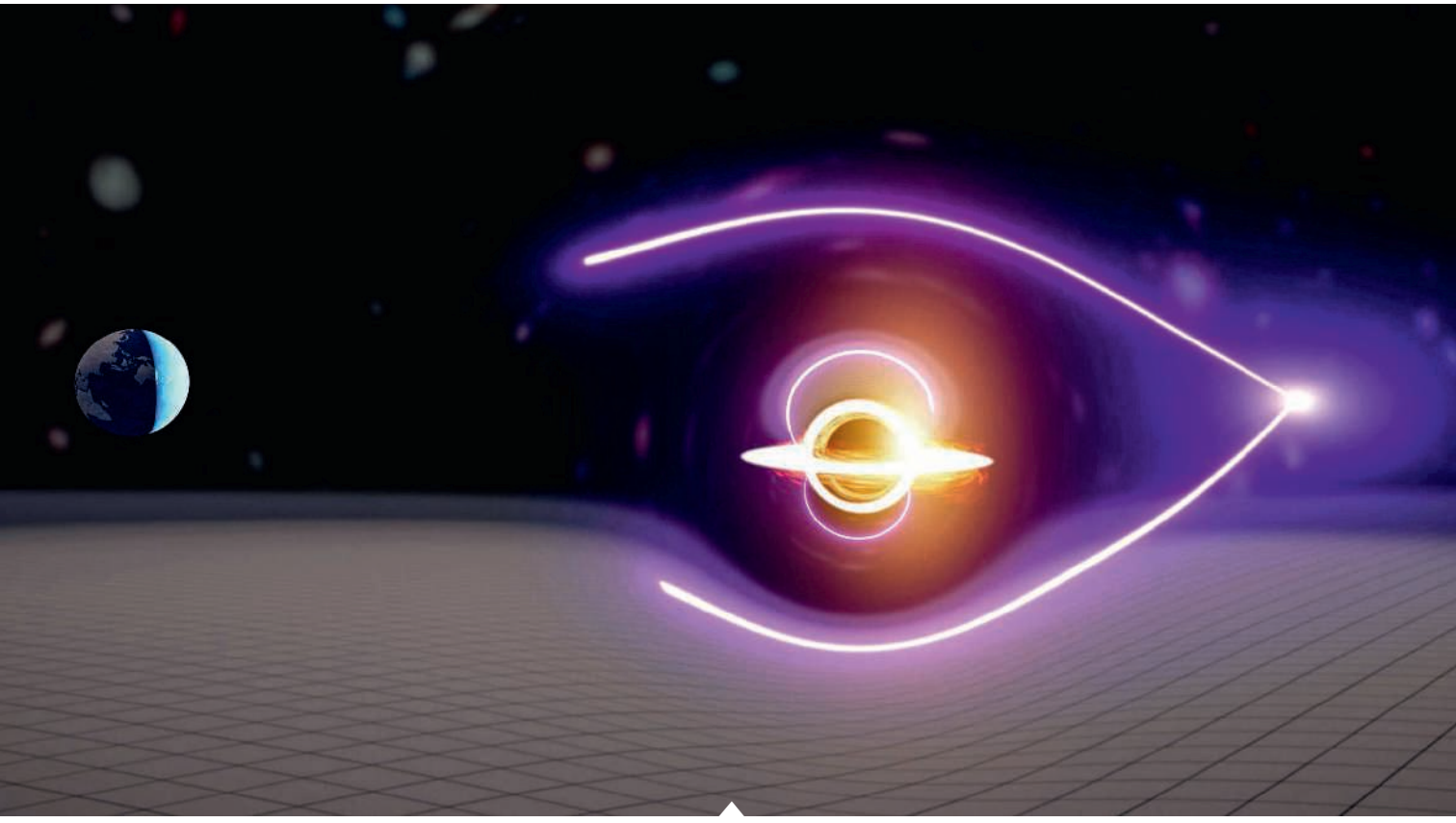
Il était la pièce manquante du puzzle. Ou plutôt, la carte du jeu des sept familles sur laquelle les scientifiques n'arrivaient pas à mettre la main. Depuis le 9 mars 2021, la « famille Trous noirs » est au complet. Un trou noir intermédiaire d'une masse égale à 55 000 fois celle de notre Soleil, objet dont l'existence n'était jusqu'ici que supposée, a enfin été observé par une équipe d'astrophysiciens de l'université de Melbourne (Australie). Cette belle « prise cosmique », qui reste toutefois à confirmer par d'autres groupes de recherche, vient combler un vide entre deux populations de trous noirs. D'abord les trous noirs stellaires, petits objets d'une dizaine de masses solaires tout au plus, nés de l'effondrement sur elle-même d'une étoile mourante. Ensuite, les supermassifs, mastodontes d'au moins un million à quelques milliards de masses solaires que l'on trouve au cœur des galaxies.

Entre les deux, les astrophysiciens étaient face à un vide que seuls des projections théoriques et des indices parvenaient à combler. Et pour cause : les techniques habituelles ne permettent pas de débusquer un trou noir de masse intermédiaire dans l'Univers. Lorsqu'ils fusionnent, les trous noirs stellaires forment des ondes gravitationnelles que captent presque chaque mois les détecteurs Virgo, en Italie, et Ligo, aux États-Unis ; les intermédiaires, eux, sont trop massifs pour former de telles ondes. De leur côté, les supermassifs, en dévorant nuages de gaz, d'étoiles et de tout ce qui passe à leur portée, deviennent de véritables fontaines ardentes de matière que les instruments scientifiques comme les télescopes spatiaux ou les antennes radio sont en mesure de capter. En revanche, les intermédiaires leur échappent, sans doute trop isolés pour avoir suffisamment de matière à absorber et devenir ainsi visibles. Il se peut même que certains trous noirs de masse intermédiaire ne dévorent pas du tout de matière, restant alors totalement tapis dans le noir ! Dès les années 1970, les physiciens estiment que ces mystérieux trous noirs de masse moyenne — entre 100 et moins d'un million de masses solaires — se nichent au sein des amas stellaires. Durant les cinquante années suivantes, les candidats se succèdent sans qu'aucun d'entre eux ne parvienne toutefois à convaincre. *« Il s'agissait à chaque fois de déductions faites à partir du rayonnement électromagnétique de leur environnement qui permettait de calculer leur masse »*, expliquait en septembre 2020 à *Sciences et Avenir* Nelson Christensen, du CNRS et de l'Observatoire de la Côte-d'Azur. Des déductions, et donc des résultats comportant encore trop d'ambiguïté.

55 000
Le nombre de masses solaires qu'atteint le trou noir détecté, occupant une place intermédiaire entre les trous noirs stellaires et les supermassifs.

À l'origine de la découverte, un signal enregistré il y a 25 ans

En mai 2019 toutefois, une détection directe fait l'effet d'une bombe dans le monde de l'astrophysique : celle, par Ligo et Virgo, du tout premier trou noir dépassant le seuil de 100 masses solaires, 142 exactement. Baptisé GW190521, son signal correspond à des ondes gravitationnelles issues de la fusion entre deux trous noirs de 85 et 65 masses solaires. Mais s'agissait-il d'un trou de masse intermédiaire ? Théoriquement oui, puisqu'il est admis qu'un trou noir de ce type a une masse comprise en 100 et 100 000 fois celle du Soleil. Pour



CARL KNOX, OZGRAV

Le trou noir intermédiaire a été repéré, le 9 mars 2021, grâce à l'enregistrement d'un sursaut gamma (puissant flash d'énergie) avec un effet de « lentille gravitationnelle » faisant dévier les rayons lumineux en deux flashs (vue d'artiste).

autant, il est à peine plus gros que les plus gros trous noirs stellaires. « *En réalité, on ne parle pas vraiment du même type d'objet. La formation d'un trou noir de 142 masses solaires s'explique facilement par la fusion de trous noirs, quand celle d'un trou noir de 55 000 masses solaires pose bien plus de questions* », nuance Marta Volonteri, spécialiste des trous noirs à l'Institut d'astrophysique de Paris.

Aussi, pour trouver l'objet tant attendu, James Paynter, doctorant à l'École de physique de l'université de Melbourne, a l'idée originale d'aller fouiller les archives du satellite américain Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) qui, entre 1991 et 2000, enregistrait des sursauts gamma, de puissants flashs d'énergie parcourant le cosmos. Ce qui intéresse James Paynter et ses collaborateurs n'est pas tant l'origine de ces sursauts — la collision de deux étoiles à neutrons — que la forme des signaux reçus. Une forme qui pourrait trahir l'existence d'un trou noir de taille intermédiaire en produisant un effet de lentille gravitationnelle sur le flux de photons du sursaut gamma. Comme n'importe quel rayon lumineux, les rayons gamma sont déviés lorsqu'ils passent à côté d'une masse très importante. Si une forte concentration de masse se trouve entre l'émission du flash et le satellite, le rayon sera dévié de telle sorte que le détecteur ne verra pas un, mais deux flashs, l'un se produisant un peu après l'autre, à quelques millisecondes d'intervalle. Certes, la probabilité de tomber sur un effet de lentille gravitationnelle est rare lorsqu'on scrute l'Univers. Mais l'en-

FABIO GOVERNATO

« Seule une physique exotique peut expliquer cette découverte. Nous devrons revoir nos théories. »

Marta Volonteri, spécialiste des trous noirs à l'Institut d'astrophysique de Paris

J. PAYNTER

VERBATIM

JAMES PAYNTER
DOCTORANT EN ASTROPHYSIQUE À L'UNIVERSITÉ DE MELBOURNE (AUSTRALIE)

« Notre objectif : mieux comprendre la formation de ces objets méconnus »

"Il est malheureusement impossible d'observer les trous noirs de masse intermédiaire de la même manière que les trous noirs supermassifs. Chez ces derniers, l'engloutissement continu de grandes quantités de matière engendre un disque d'accrétion qui rayonne dans toutes les longueurs d'onde, des rayons radio aux rayons X. Ces disques d'accrétion ultrabrillants, connus sous le nom de quasars, sont les sources constantes les plus lumineuses du ciel nocturne ! Les trous noirs de masse intermédiaire, eux, ne bénéficient pas du même apport constant de matière qui les fait croître ou briller. Ils n'habitent pas les noyaux de galaxies, mais plus probablement les périphéries galactiques — bien que l'on ne sache pas encore exactement où ils se cachent tous. Ce que l'on sait en revanche, c'est qu'ils sont noirs, vraiment noirs. En partant de ce principe, on peut se demander comment ils ont fini par atteindre parfois jusqu'à plusieurs centaines de milliers de masses solaires. Nous avons des pistes, mais le champ des possibles reste ouvert. C'est l'une des raisons pour lesquelles nous attendons avec impatience la nouvelle génération de télescopes et de détecteurs d'ondes gravitationnelles. Elle nous permettra de mieux comprendre les processus de formation de ces objets méconnus, et surtout totalement fascinants."

semble des données de CGRO n'a pas été choisi au hasard : immense, il maximise les chances d'en cacher une. Parmi les 2700 sursauts passés au crible par un puissant logiciel, James Paynter finit par repérer un signal correspondant au profil du suspect : GRB950830, enregistré il y a vingt-cinq ans à une distance de plus de 10 milliards d'années-lumière. Son étude fine permet de remonter à la masse de l'objet semblant faire office de lentille, estimée à 55 000 fois celle de notre Soleil, donc. L'étau se resserre. Mais avant de crier victoire, il reste encore à éliminer les autres aspirants au rôle de lentille : celle-ci pourrait en effet avoir été produite par un amas globulaire (un rassemblement très dense d'étoiles) ou encore un halo de matière noire. Après calculs, rien de tout cela ne semble assez compact pour dévier à ce point la lumière. Il ne reste qu'une option : un trou noir de masse intermédiaire.

Cette découverte n'est pas sans poser de souci statistique : d'après les équations de James Paynter, la présence d'un tel objet à cet endroit implique qu'environ 50 000 trous noirs de ce type seraient présents dans chaque galaxie, là où les modèles n'en prédisent aujourd'hui qu'une dizaine ! *« Seule une physique exotique peut expliquer un tel écart. Mais si cette découverte se révèle vraie, c'est tout à fait fascinant, et nous devrons revoir nos théories »*, affirme Marta Volonteri.

L'hypothèse des « trous noirs primordiaux »

Les trous noirs intermédiaires pourraient être la clé d'une énigme sur laquelle planchent les scientifiques depuis des années : comment des trous noirs massifs et supermassifs, dont certains observés au plus jeune âge de l'Univers, ont-ils pu se former ? En effet, leur masse colossale est incompatible avec l'idée d'une accrétion de matière importante par de petits trous noirs stellaires. Celle-ci n'aurait tout simplement pas eu le temps de se faire en une poignée de milliards d'années. L'une des explications aujourd'hui avancées est justement celle de la fusion successive de trous noirs intermédiaires qui seraient apparus très vite après le Big Bang. Appelés « trous noirs primordiaux », ces objets correspondraient à des fossiles de phases primitives du cosmos, lorsque la densité de matière était élevée. Ils pourraient par exemple avoir été formés à partir de la toute première génération d'étoiles. Ou encore par l'effondrement direct de grands nuages de gaz d'hydrogène vierge dans ce même Univers primitif. Le chemin reste encore long avant d'affirmer que les trous noirs intermédiaires sont les trous noirs primordiaux des premiers instants de l'Univers. ■ **Marine Benoit** @marin_eben

10

L'ADN prend un coup de vieux

Des chercheurs sont parvenus à analyser des molaires de mammouths contenant de l'ADN mitochondrial vieux de 1,2 million d'années. Un record de datation.

L'ADN est une molécule aussi précieuse pour comprendre l'évolution des espèces que fragile face aux affres du temps : une équipe américano-australienne a établi qu'elle se désagrège de moitié en 521 ans. La moitié de ce qui reste disparaît à son tour en 521 ans… En pratique, les conditions de préservation ou de fossilisation raccourcissent encore cette limite. Le record du plus vieil ADN était jusqu'ici détenu par un cheval de Przewalski, dont l'âge a été estimé à environ 700 000 ans. Une équipe du Centre de paléogénétique de Stockholm (Suède), en association avec des chercheurs de neuf autres institutions, a fait cette année un extraordinaire bond en arrière de près de 500 000 ans !

Extraites du permafrost du Nord-Est sibérien, des molaires provenant de trois spécimens de mammouths contenaient en effet de l'ADN mitochondrial remontant jusqu'à 1,2 million d'années (voire jusqu'à 1,65 million d'années selon la technique de datation). C'est une infime quantité de matériau très dégradé que les scientifiques ont pu récupérer mais l'exploit est de taille : *« Les échantillons sont 1000 fois plus vieux que les restes des Vikings et sont même antérieurs à l'existence des humains et des néandertaliens »*, s'enthousiasmait Love Dalén, professeur de génétique de l'évolution au Centre de paléogénétique de Stockholm, lors de la publication.

Ce morceau de molaire (à droite) a permis d'identifier l'ADN d'un mammouth des steppes (ci-dessous, vue d'artiste), un des trois spécimens trouvés en Sibérie, âgé de 1 à 1,3 million d'années.

BETH ZAIKEN/CENTRE FOR PALAEOGENETICS - PAVEL NIKOLSKIY

Une lignée de mammouths jusque-là inconnue

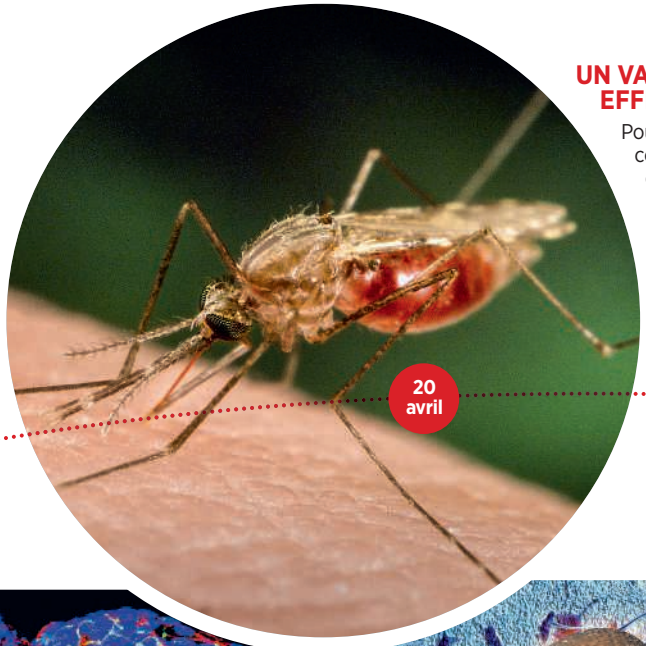
Les scientifiques ont immédiatement fait parler ce matériel génétique historique. L'animal le plus ancien appartient à une lignée de mammouths jusque-là inconnue, qui a été baptisée « Krestovka ». Elle aurait divergé d'une autre espèce sibérienne il y a plus de 2 millions d'années. Sa découverte est une véritable surprise car les paléontologues pensaient jusqu'ici qu'une seule espèce de mammouths occupait la Sibérie à cette époque. Les données génétiques indiquent aussi que ce sont ces mammouths de Krestovka qui ont colonisé l'Amérique du Nord, il y a environ 1,5 million d'années. Ils s'y sont hybridés avec le mammouth laineux il y a environ 420 000 ans pour donner naissance au mammouth de Colomb *(Mammuthus columbi)*, qui s'est épanoui en Amérique du Nord pendant la dernière période glaciaire.

Les deux autres spécimens, plus jeunes, ont également été examinés. D'abord Adycha, âgé entre 1 et 1,3 million d'années. Presque 25 % de son ADN a pu être reconstitué, ce qui permet d'affirmer qu'il s'agit bien d'un mammouth des steppes et que c'est un ancêtre direct du mammouth laineux représenté par le troisième spécimen, Tchoukochya, âgé de 700 000 ans environ. C'est le plus ancien mammouth laineux découvert et près de 80 % de son génome a pu être reconstitué.

Joël Ignasse @IgnasseJ

Ces événements ont (aussi) fait l'année scientifique

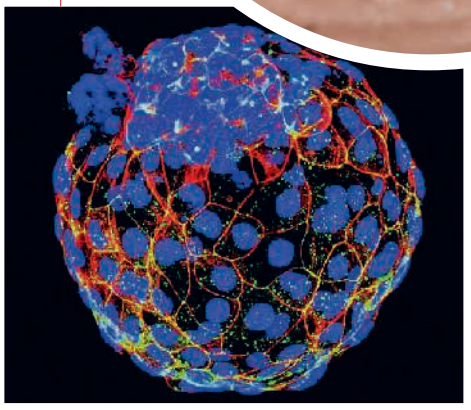
Médecine, espace, astronomie, environnement, technologie, archéologie… Voici les principaux épisodes remarquables en science tout au long de 2021.



UN VACCIN ANTIPALUDIQUE EFFICACE

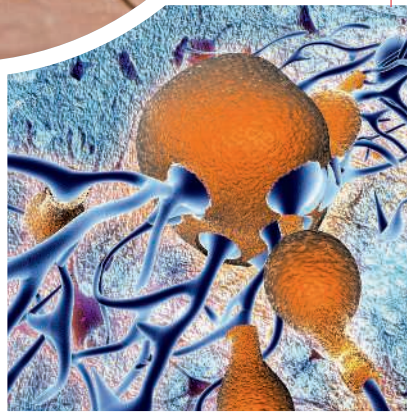
Pour la première fois, un candidat vaccin contre le paludisme atteint 77 % d'efficacité en phase 2. Développé par l'université d'Oxford (Royaume-Uni), le R21/Matrix-M surpasse les 39 % du Mosquirix de GlaxoSmithKline, vaccin pour lequel l'Organisation mondiale de la santé donnera son feu vert en octobre.

17 mars — 20 avril — 7 juin — 8 août



DES EMBRYONS SANS SPERMATOZOÏDE NI OVULE

Deux équipes, l'une américaine, l'autre australienne, ont, indépendamment l'une de l'autre, réussi à créer les premiers embryons artificiels humains complets à partir de cellules souches embryonnaires et de cellules de peau.



FEU VERT POUR UN MÉDICAMENT ANTI-ALZHEIMER

L'Aduhelm (aducanumab) de l'américain Biogen peut être commercialisé, annonce la Food and Drug Administration. Les essais cliniques du premier médicament contre Alzheimer, qui s'attaquerait à la maladie elle-même et non uniquement à ses symptômes, avaient pourtant été décevants.

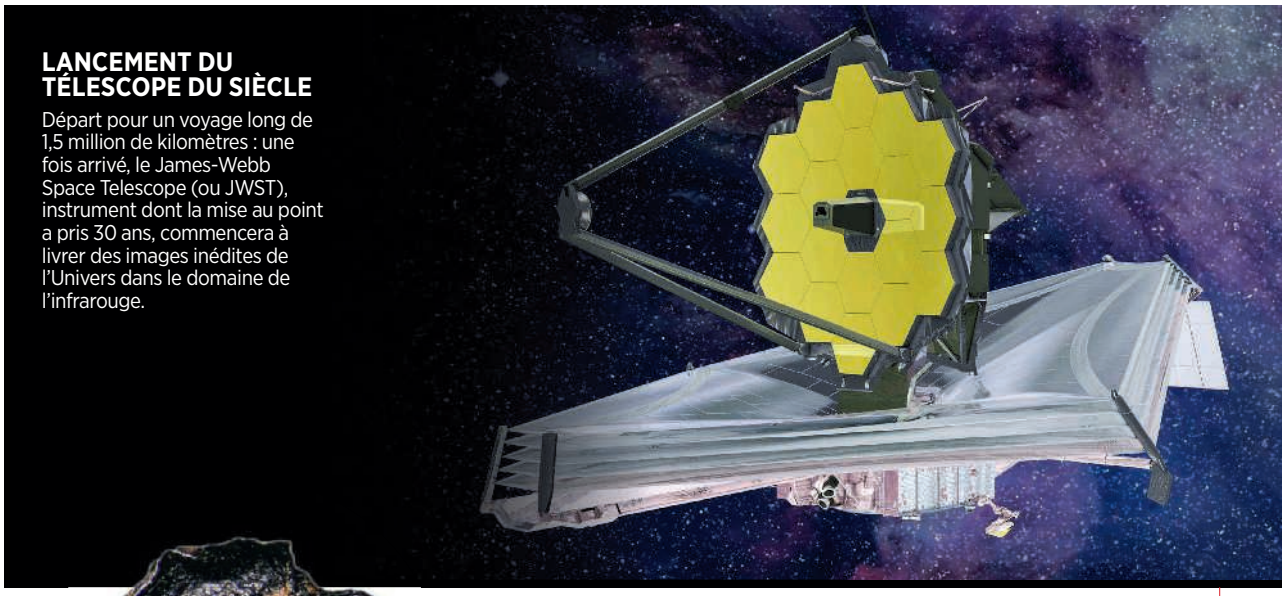
RECORD DE FUSION NUCLÉAIRE

Le National Ignition Facility, en Californie (États-Unis), a atteint un nouveau record de fusion : une énergie dégagée de 1,35 mégajoule, soit 70 % de l'énergie dépensée pour la produire. C'est huit fois plus que le précédent record.

PHOTOS: PHANIE - UNIVERSITY OF TEXAS SOUTHWESTERN MEDICAL CENTER - NIF LIVERMORE

LANCEMENT DU TÉLESCOPE DU SIÈCLE

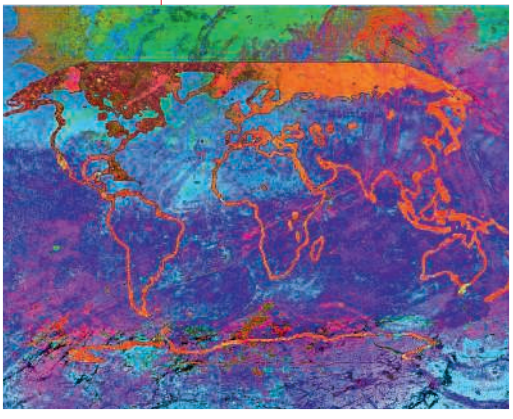
Départ pour un voyage long de 1,5 million de kilomètres : une fois arrivé, le James-Webb Space Telescope (ou JWST), instrument dont la mise au point a pris 30 ans, commencera à livrer des images inédites de l'Univers dans le domaine de l'infrarouge.



RECUL DE LA DOMESTICATION DU FEU EN FRANCE

Des traces de feu vieilles de 560 000 ans dans la Caune de l'Arago, à Tautavel (Pyrénées Orientales), reculent de 160 000 ans la domestication du feu en Europe.

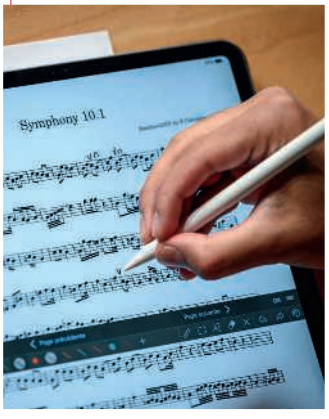
9 août — 14 sept. — 15 sept. — 9 oct. — 22 déc.



6E RAPPORT DU GIEC : NOUVELLE ALERTE

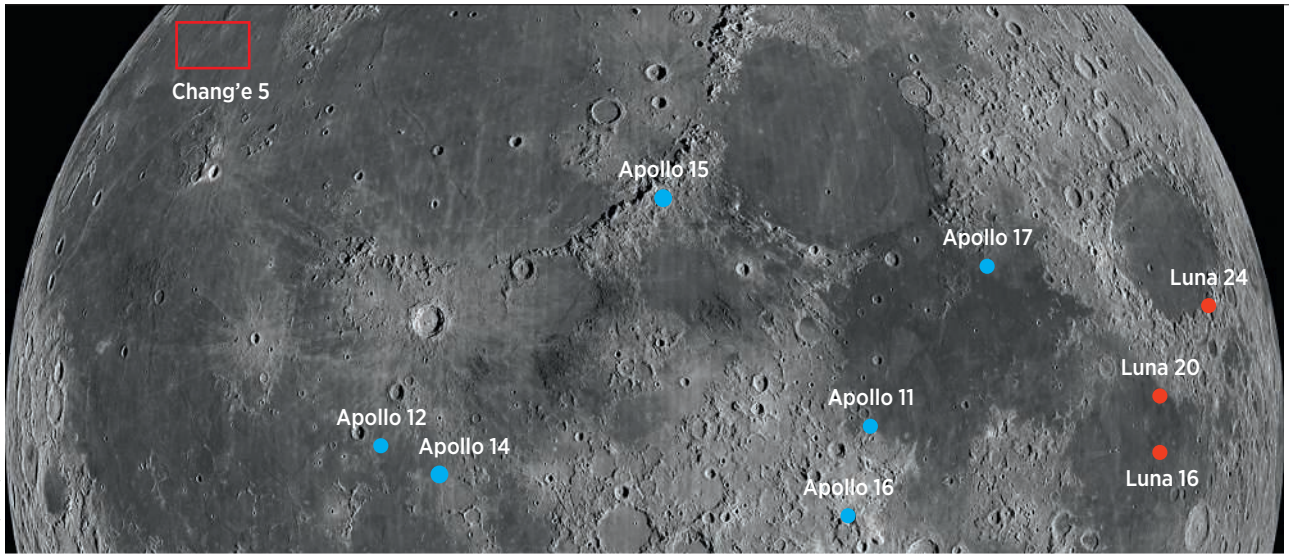
Les experts du climat annoncent que c'est irréversible : la température de la planète va continuer de grimper au moins jusqu'au milieu du siècle. Avec davantage d'événements météorologiques extrêmes.

LES PREMIERS « TOURISTES » DE L'ESPACE

C'est un tournant dans l'histoire des voyages spatiaux : un vaisseau privé a emmené dans l'espace quatre astronautes non professionnels, qui ont évolué seuls dans la capsule Dragon de SpaceX durant trois jours jusqu'à 590 km d'altitude.

LA 10E SYMPHONIE DE BEETHOVEN ACHEVÉE PAR UNE IA

L'œuvre n'existait qu'au travers de fragments épars, mais elle a été terminée par une intelligence artificielle, Beethoven AI, développée à l'initiative de l'institut Karajan à Salzbourg (Autriche).

PHOTOS : SIPA - D. DELDICQUE ET AL. - IPCC - SIPA - AFP



NASA/GSFC/ARIZONA STATE UNIV/LUNAR RECONNAISSANCE ORBITER

EYEPRESS NEWS/EYEPRESS/AFP

SIPA

La Chine a choisi une région inexplorée de la Lune (image du haut) pour prélever de nouveaux fragments de roche, après les missions américaines Apollo (en bleu) et soviétiques Luna (en rouge) des années 1960-1970. Posée le 1er décembre 2020, la sonde chinoise a récolté 1,73 kg d'échantillons (image du milieu) avant d'atterrir 15 jours plus tard en Mongolie-Intérieure (Chine, ci-dessus).

Exploration lunaire

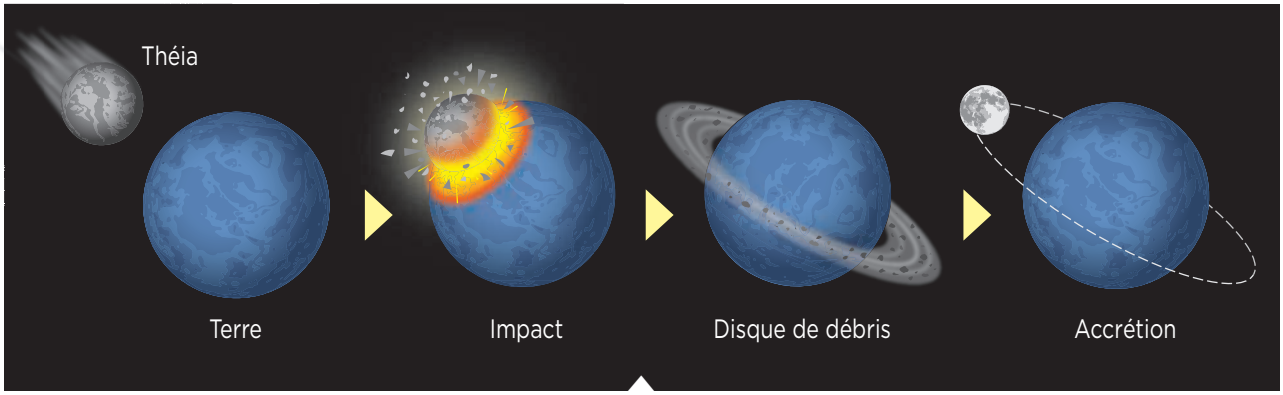
Les échantillons chinois parlent

Des volcans étaient en activité sur la Lune il y a deux milliards d'années ! Alors que toutes les connaissances géologiques provenaient des missions Apollo, voici un demi-siècle, une mission express chinoise menée en 2020 vient de livrer ses premiers enseignements. En rapportant les plus jeunes cailloux lunaires jamais observés, elle réécrit l'histoire de notre satellite naturel.

Par Franck Daninos @fdaninos

Depuis 1976 : cela faisait près d'un demi-siècle que des échantillons n'avaient pas été grappillés sur la Lune. Et finalement, il aura fallu moins d'une année à la Chine pour envoyer une sonde robotisée à la surface de notre satellite, prélever des pierres volcaniques, les rapatrier sur Terre et produire — en octobre dernier — les premières analyses. *« Tout cela s'est fait très rapidement. Les équipes qui ont examiné ces fragments de roche ont utilisé des techniques de pointe et travaillé d'arrache-pied pour publier en un temps record les premières conclusions »*, confirme Frédéric Moynier, chercheur à l'Institut de physique du globe de Paris et spécialiste de la géologie de la Lune. Il faut dire que ces résultats étaient très attendus. Et les espoirs n'ont pas été déçus. Ces roches volcaniques lunaires ont été datées de « seulement » deux milliards d'années, soit les plus jeunes jamais analysées en laboratoire ! Elles attestent que la Lune crachait encore de la lave à cette époque-là… à la grande stupéfaction des planétologues.

Les premiers échantillons de notre satellite naturel ont été rapportés par la mission américaine Apollo 11 en 1969. Les astronautes Neil Armstrong et Buzz Aldrin, premiers « moonwalkers » de l'histoire, ramassèrent alors 22 kg de roches et de fines poussières (appelées régolithe) à l'aide de pinces, de marteaux et de pelles. Par la suite, cinq autres missions (Apollo 12, 14, 15, 16, 17 — la dernière décollant en 1972) rapportèrent des quantités crois-



BRUNO BOURGEOIS

C'est de l'impact cataclysmique entre la Terre et une protoplanète, Théia, que serait née la Lune, il y a 4,5 milliards d'années.

santes pour un stock total de 382 kg. Entre 1970 et 1976, l'ex-Union soviétique collecta, elle aussi, des échantillons grâce aux sondes automatisées Luna 16, 20 et 24 : des poussières uniquement et en quantité mille fois moins importante (326 grammes).
« *Les analyses ont produit des découvertes majeures* », rappelle Frédéric Moynier. En particulier sur l'origine du système Terre-Lune. Car en comparant la composition des roches terrestres et lunaires — qui possèdent de remarquables similitudes —, les scientifiques ont pu établir que l'astre sélène est né d'un impact cataclysmique entre un « ancêtre » de la Terre et une protoplanète de la taille de Mars il y a 4,5 milliards d'années *(voir l'infographie ci-dessus)*, peu après la formation du Système solaire. Les « stigmates » laissés par les particules du vent solaire sur le régolithe ont permis de retracer également l'activité et la composition de notre étoile dans sa prime jeunesse, ses teneurs en oxygène et en lithium en particulier. Enfin, c'est grâce aux échantillons des missions Apollo et Luna qu'on peut déterminer, rien qu'en les observant, l'âge de tous les terrains du Système solaire interne (jusqu'à Jupiter). « *Ils ont permis d'établir une correspondance entre l'ancienneté d'une surface rocheuse et les impacts de météorites qui la parsèment,* explique Cathy Quantin-Nataf, planétologue à l'université Claude-Bernard Lyon-1 (Rhône). *Plus les cratères sont larges et nombreux, plus la surface est ancienne. C'est la seule méthode que nous possédons pour estimer l'âge des surfaces extraterrestres, de Mars à Mercure en passant par les astéroïdes.* »

Des fragments plus jeunes, issus d'une région inexplorée

Conservés par la Nasa à Houston (Texas), les échantillons d'Apollo font l'objet aujourd'hui encore de nombreuses recherches (il ne reste quasiment rien du régolithe soviétique). Très précieux et ô combien prolifiques, ils soulèvent néanmoins d'épineux problèmes. « *Tout ce qu'on sait de la Lune provient essentiellement des échantillons Apollo* », souligne Frédéric Moynier. Or ils ont été recueillis sur des

CALENDRIER

Les missions lunaires en préparation

Abandonnées pendant près d'un demi-siècle, les missions de retour d'échantillons lunaires devraient à l'avenir se multiplier. Après Chang'e 5, la Chine échafaude déjà Chang'e 6, qui devrait s'envoler en 2024. Parmi les cibles privilégiées, le bassin Pôle Sud-Aitken, sur un site qui se trouverait à la fois au niveau du pôle sud (supposément riche en eau) et de la face cachée (où des parties du manteau affleureraient). Ce qui constituerait une grande première. Les États-Unis préparent, de leur côté, le grand retour des missions habitées sur la Lune. Prévues vers 2025, elles comprennent des opérations de collecte par des astronautes, là encore au pôle sud. Alliés aux Japonais et aux Canadiens, les Européens devraient glaner pour leur part leurs premiers échantillons lunaires avec la mission Heracles : elle prévoit d'en collecter 15 kg en 2027, peut-être sur la face cachée. La Russie, enfin, espère renouer avec la glorieuse période de l'astronautique soviétique en lançant d'ici six ou sept ans Luna 28. La mission, qui vise elle aussi le pôle sud, souffrirait cependant d'importants retards.

sites très rapprochés, semblables géologiquement. L'âge de ces roches est du reste assez similaire : entre 3,1 et 4,4 milliards d'années. *« La vision qui en résulte est donc nécessairement biaisée,* poursuit le chercheur. *En exagérant un peu, c'est comme si on tentait de décrire notre propre planète, sur sa richesse minérale par exemple, à partir d'une demi-douzaine de prélèvements recueillis dans une seule région. »*
Pour avoir une image plus complète, d'autres sites — en particulier plus récents — doivent donc être inspectés. Et c'est bien l'objectif qui était visé par la mission Chang'e 5 (du nom de la déesse de la Lune dans la mythologie chinoise) mise sur pied par l'administration spatiale nationale chinoise (CNSA). En novembre 2020, un vaisseau de 8,2 tonnes est parti de la base de lancement de Wenchang. Il a déposé, quelques semaines plus tard, un atterrisseur dans la partie nord-ouest de l'Océan des tempêtes, située elle-même à l'ouest de la face visible de la Lune. *« Grâce à la méthode de datation par comptage de cratères, on pensait que ces terrains devaient être particulièrement jeunes, âgés de 1,5 à 2,5 milliards d'années »*, précise Cathy Quantin-Nataf. C'est dans cette région inexplorée que l'atterrisseur a donc déployé une pelle robotisée ainsi qu'une foreuse, technologies inspirées des missions soviétiques Luna. L'engin a ensuite redécollé et rapporté sur Terre, en décembre 2020, 1,73 kg de matériaux.

JIN LIWANG / XINHUA / AFP

1,73 kg de régolithe et de petits cailloux ont été rapportés par la sonde Chang'e 5 en décembre 2020 (ici la pesée par les chercheurs chinois).

Surtout du régolithe mais aussi quantité de petits cailloux.
Après un travail d'inventaire, la CNSA a lancé en juin 2021 les premiers appels à projets. Ils n'étaient réservés qu'à des scientifiques basés en Chine, les analyses devant être réalisées sur le territoire national. Mais ces chercheurs ont pu solliciter le concours d'experts étrangers, *« comme le géologue américain James Head, figure incontournable du domaine qui entraîna les astronautes d'Apollo, mais également notre équipe fondée par le Britannique Grenville Turner, un des trois scientifiques qui détermina l'âge des tout premiers fragments recueillis en 1969 »*, raconte Romain Tartèse, géochimiste à l'université de Manchester (Royaume-Uni). Lui-même a fait partie du groupe de chercheurs chinois, américains, britanniques, suédois et australiens qui en octobre dernier ont livré leur verdict : les nouveaux fragments sont âgés de 1,97 milliard d'années. Enfin de « jeunes » cailloux lunaires !

Les plus anciennes traces de volcanisme

Une première répercussion concerne la technique par comptage de cratères. *« Si les correspondances étaient très bien calibrées pour les terrains âgés de 3 à 4 milliards d'années, nous n'avions aucune donnée validant les périodes plus récentes. Il y avait un vide énorme »*, insiste Cathy Quantin-Nataf. Faute de mieux, les planétologues ne se fiaient ainsi qu'à des extrapolations. Or les échantillons chinois démontrent que celles-ci étaient globalement… exactes ! *« Le nouveau point est très proche des*

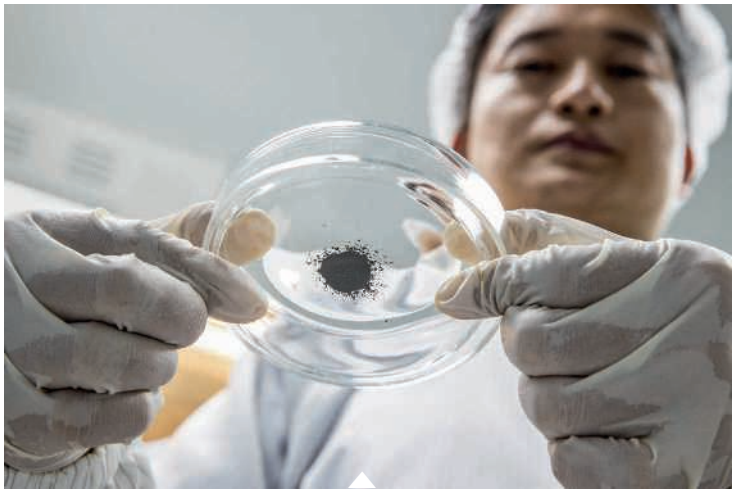
COLLABORATION INTERNATIONALE

La guerre froide des échantillons

Considérés comme des « biens de l'humanité », les fragments de Lune recueillis entre 1969 et 1972 par les missions américaines Apollo peuvent être examinés par tous les chercheurs étrangers qui en font la demande. Sauf les scientifiques chinois ! Depuis 2011, une loi du Congrès américain (l'amendement Wolf, qui vise à freiner le développement technologique de la Chine) interdit en effet à la Nasa toute collaboration directe. Quelle politique la Chine mènera-t-elle avec ses propres échantillons ? *« Elle fera probablement de même, par mesure de rétorsion. Ou proposera un donnant-donnant. Elle pourrait se montrer aussi plus ouverte, pour des questions d'image et de politique extérieure »*, s'interroge le cosmochimiste Frédéric Moynier. Réponse dans quelques semaines lorsque la Chine ouvrira ce « trésor » aux projets internationaux.

Fragment de basalte rapporté par la mission Chang'e 5 (vu ici en stéréomicrographie).

CNSA/GRAS/NAOC



JIN LIWANG/ XINHUA / AFP

La datation à 2 milliards d'années de certains échantillons rallonge d'environ un milliard d'années les plus anciennes traces de volcanisme.

courbes que nous imaginions. C'est un soulagement », reconnaît l'experte. Mais ces résultats permettent aussi d'affiner la méthode. « *Ils montrent que nous avions tendance à surévaluer le flux d'impacts dans cette gamme de période et donc à vieillir un peu les surfaces* », détaille la planétologue. Grâce aux échantillons de Chang'e 5, les scientifiques dateront ainsi plus précisément les surfaces rocheuses du Système solaire, sur Mars en particulier qui possède de nombreux terrains âgés de 2 à 3 milliards d'années.

Une autre retombée importante concerne l'histoire géologique de la Lune. Parmi les roches analysées se trouvent en effet des basaltes. Autrement dit du magma qui s'est donc solidifié il y a 2 milliards d'années… et qui rallonge d'environ un milliard d'années les plus anciennes traces de volcanisme *(lire l'encadré ci-dessous)* ! « *Selon nos calculs, la région où Chang'e 5 s'est posée abriterait 2000 km³ de basaltes* », estime Romain Tartèse. Problème : comment la Lune a-t-elle pu conserver une activité volcanique sur une aussi longue période — soit 2,5 milliards d'années après sa formation ? Cent fois moins volumineuse que la Terre, elle se refroidit en effet bien plus rapidement. Et elle ne possède pas de tectonique des plaques, qui sur notre planète est la principale source du volcanisme.

« *C'est pour le moment une énigme* », lâche Caty Quantin-Nataf. Selon l'hypothèse la plus simple, les roches du manteau qui ont donné naissance à ces basaltes devaient contenir des quantités particulièrement importantes d'atomes radioactifs comme l'uranium, le thorium et le potassium — sources de chaleur qui leur auraient permis de rester chaudes et fondre plus tardivement.

Des structures minéralogiques non identifiées ?

« *Mais nos examens n'ont dévoilé aucun enrichissement de ce type* », tranche Romain Tartèse. Une autre explication est testée actuellement. Elle fait intervenir les « forces de marée », autrement dit la force gravitationnelle qu'exerce notre planète sur les profondeurs ductiles de la Lune. Il y a deux milliards d'années, celle-ci était en effet plus proche de la Terre, peut-être à deux tiers de sa distance actuelle. Plus intenses, ces forces engendraient ainsi des frictions et des sources de chaleur éventuellement suffisantes pour liquéfier les roches du manteau. « *Des simulations numériques sont en cours,* signale Cathy Quantin-Nataf. *Nous aurons bientôt la réponse.* »

Il se pourrait, enfin, que des examens plus poussés dévoilent des structures minéralogiques non identifiées jusqu'alors. Très

RECENSEMENT

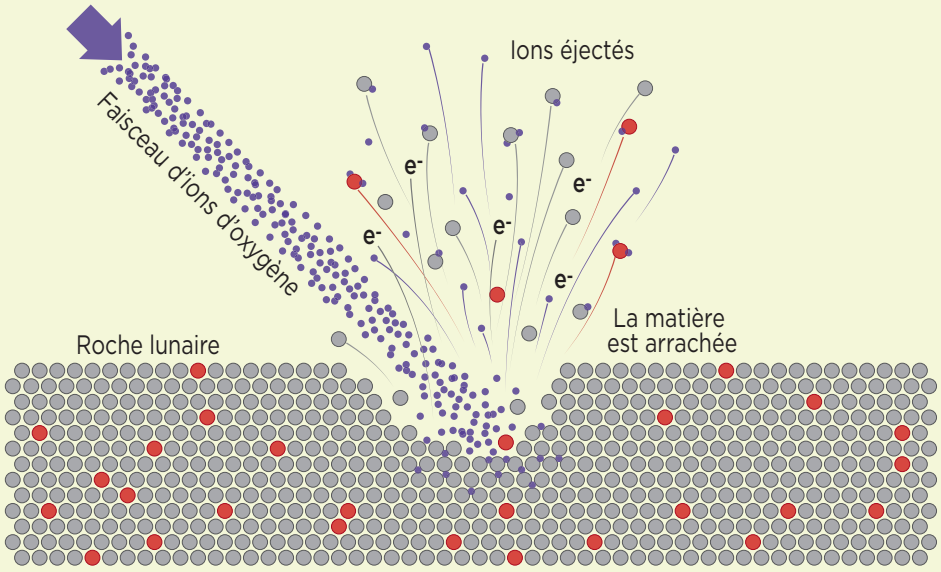
Les météorites, autres morceaux de Lune

Les échantillons rapportés par des sondes spatiales ne sont pas les seuls fragments que nous possédons de la Lune. Parmi les 70 000 météorites identifiées à ce jour, plusieurs centaines proviennent de l'astre sélène. Elles ont été arrachées lors de violents impacts d'astéroïdes avant d'errer dans l'espace et retomber ici-bas. Retrouvées au Maroc (NWA 032) en 1999 et en Antarctique (La Paz Icefield 02205) en 2002, deux d'entre elles contiennent des basaltes âgés de 2,9 milliards d'années. Plus jeunes de 200 millions d'années, par conséquent, que les plus récentes pierres volcaniques des échantillons Apollo. *« Les informations qu'on peut en tirer sont toutefois limitées*, relève le géologue Jérôme Gattacceca. *Car on ne connaît pas leur contexte géologique, les terrains d'où elles proviennent. »*

INSTRUMENT

Comment les échantillons chinois ont été datés

Désigné par l'acronyme SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion MicroProbe), l'instrument qui a permis de dater les nouveaux échantillons lunaires a été développé par l'Université nationale australienne à Canberra. *« C'est le même type d'appareil qui avait déterminé l'âge des échantillons d'Apollo au début des années 1970,* précise le géochimiste Romain Tartèse. *Mais les scientifiques utilisent aujourd'hui la 4e génération, qui permet d'analyser des fragments de quelques millionièmes de gramme.* » Un faisceau d'ions d'oxygène en bombarde d'abord la surface, créant des cavités de quelques micromètres (millièmes de millimètre) de large. Les atomes éjectés sont captés par un spectromètre de masse. Celui-ci en détermine alors la nature et l'abondance, même à l'état de trace. Ce qui intéresse les chercheurs : les atomes de plomb et leurs différents isotopes, dont la masse diffère légèrement. Deux de ces isotopes, le plomb 206 et le plomb 207, résultent de la désintégration radioactive de l'uranium 238 et de l'uranium 235 présents initialement dans les roches. En connaissant leur taux de désintégration et en quantifiant les différents isotopes du plomb, on établit ainsi un âge.



BRUNO BOURGEOIS

Un faisceau d'ions d'oxygène arrache et éjecte les éléments contenus dans la roche, en particulier les isotopes du plomb (en rouge) qui permettent de dater l'échantillon.

riches en fer par exemple, ce qui abaisserait la température de fusion et permettrait à la lave de couler. Déjà lancées par des équipes chinoises, de telles analyses sont amenées à se multiplier. Car en janvier ou février prochain, la CNSA ouvrira des appels à projets aux laboratoires internationaux *(lire l'encadré p. 57). « Les études que nous souhaitons réaliser, à l'aide de nos spectromètres de masse, sont extrêmement fines,* se positionne Frédéric Moynier. *Elles concernent les éléments les plus volatils comme le zinc, le potassium et autres métaux, ainsi que d'éventuelles molécules d'eau.* »

Jérôme Gattacceca est lui aussi sur les rangs. Son équipe du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege) à Aix-en-Provence est l'une des seules à travailler sur le paléomagnétisme de la Lune. *« Grâce aux échantillons Apollo, nous savons qu'elle possédait un champ magnétique global pendant au moins 3 milliards d'années* », signale le géologue. Comme sur Terre, il est généré par des mouvements de convection à l'intérieur du noyau. Mais les scientifiques ne savent pas à quel moment il a pu disparaître. Les échantillons chinois constituent une aubaine pour répondre à cette question. En mesurant l'aimantation de ces roches âgées de 2 milliards d'années, elles apporteront en effet une réponse. Et ce faisant de nouvelles indications sur la structure interne de la Lune et son évolution au cours du temps. *« Les investigations ne font que commencer,* conclut Jérôme Gattacceca. *Ces nouveaux matériaux intéressent tous les spécialistes de la Lune. Ils permettront de répondre à de nombreuses questions et combler d'importantes lacunes sur l'histoire de notre compagnon céleste.* ■

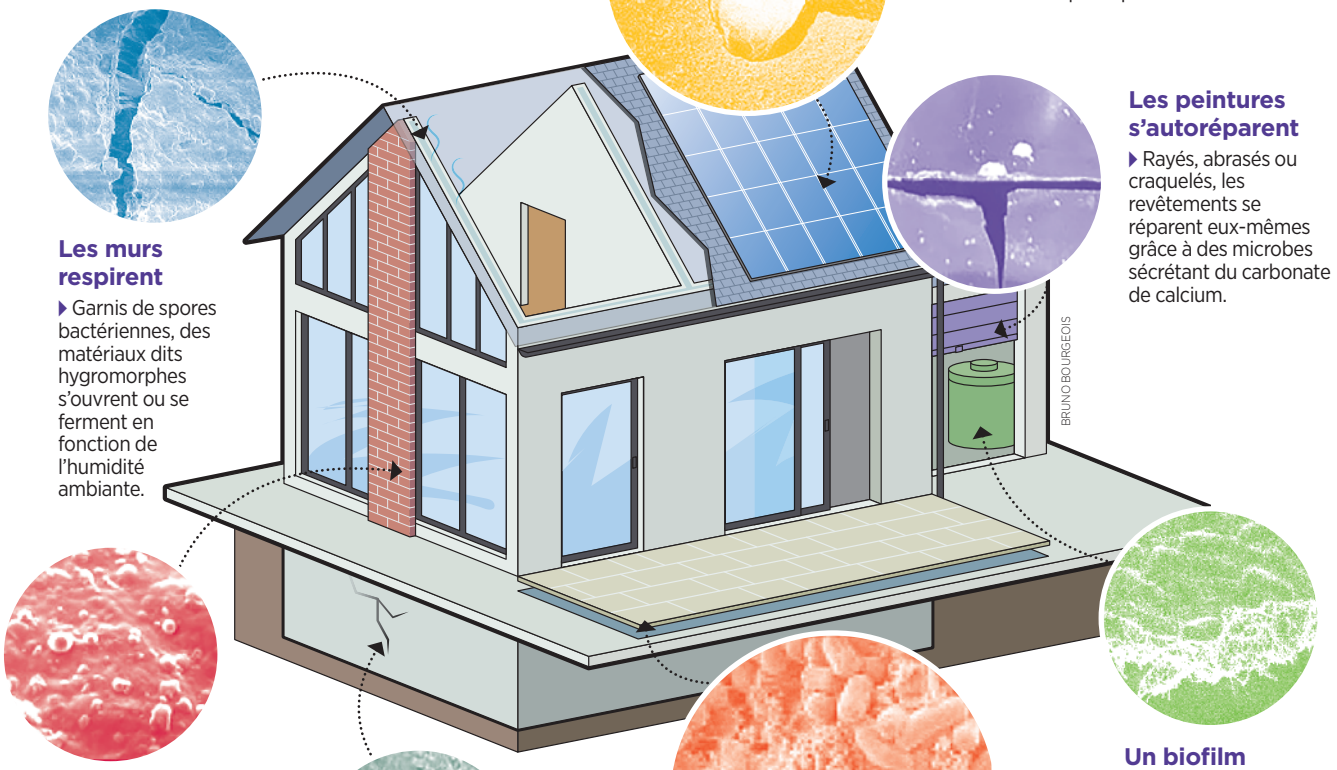
Les matériaux de construction prennent vie

Ils s'auto-organisent, s'autoréparent, réagissent aux modifications de leur environnement, ou en encore produisent des molécules : les derniers-nés des matériaux d'ingénierie ouvrent des perspectives nouvelles dans le bâtiment et l'industrie. Pour les mettre au point, les chercheurs sont parvenus à introduire de la vie dans des structures inertes telles que des polymères, du béton ou du verre.

Le bâtiment n'est équipé d'aucun système de ventilation, pourtant il « respire ». Ses murs, semblables à une peau, possèdent d'invisibles interstices qui régulent la température et l'humidité ambiantes. Ils s'ouvrent lorsque celles-ci dépassent un certain seuil, permettant à l'air de circuler à travers les parois. Et lorsque l'extérieur est trop humide, les pores se referment pour que l'intérieur reste sec. Le tout sans la moindre source d'énergie ni émission de gaz à effet de serre ! De telles habitations pourraient voir le jour d'ici à quelques années grâce à un nouveau type de matériaux développé par le Hub for Biotechnology in the Built Environment, une collaboration entre des chercheurs de l'université de Newcastle et de l'université de Northumbria (Royaume-Uni). Baptisé « Respire : Passive, Responsive, Variable Porosity Building Skins », leur projet vient de recevoir un premier financement privé de 400 000 euros. *« Il consiste à incorporer les spores d'un micro-organisme — la bactérie* Bacillus subtilis *— entre des couches inertes de latex »*, explique Ben Bridgens, un des membres de l'équipe. Ces spores, qui mesurent un micromètre (un millième de millimètre) de diamètre, se contractent ou s'élargissent en fonction du taux d'humidité. Elles se comportent ainsi comme des pistons pouvant pousser une fois et demie leur propre masse, ce qui dégage de minuscules orifices. Des tests visant à intégrer le dispositif dans des matériaux de construction sont en cours. Et des prototypes seront présentés au public *« dès le courant de l'année prochaine »*, assure le scientifique britannique.

Ces murs qui respirent ne sont que l'une des nombreuses applications envisagées pour une nouvelle famille de matériaux dénommés « matériaux vivants d'ingénierie » ou plus simplement « matériaux vivants ». *« L'idée générale consiste à introduire de la vie dans des structures inertes tels que des polymères, du béton ou du verre. Les organismes vivants peuvent être des bactéries ou des champignons mais aussi des cellules végétales et même animales »*, indique Bao-Lian Su, chimiste à l'université de Namur (Belgique) et membre de l'Académie européenne des sciences, qui a introduit cette appellation au milieu des années 2000. *« Les cellules ne sont pas uniquement*

Les différents éléments d'un bâtiment vivant



BRUNO BOURGEOIS

Des panneaux photosynthétiques

Des cellules de feuilles d'épinards incorporées dans de la silice produisent de l'énergie en captant la lumière et le dioxyde de carbone atmosphérique.

Les peintures s'autoréparent

Rayés, abrasés ou craquelés, les revêtements se réparent eux-mêmes grâce à des microbes sécrétant du carbonate de calcium.

Les murs respirent

Garnis de spores bactériennes, des matériaux dits hygromorphes s'ouvrent ou se ferment en fonction de l'humidité ambiante.

Les briques s'autorépliquent

À partir d'une seule brique composée de cyanobactéries, de gélatine et de sable, on en fabrique d'autres de façon exponentielle.

Le béton bouche ses trous

Des spores de champignons incorporées dans le béton colmatent les fissures dès qu'elles apparaissent.

Une colle vivante

Un gel contenant des bactéries et diverses protéines — issues des moules notamment — fait adhérer les matériaux de construction.

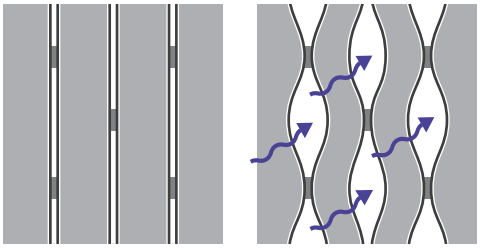
Un biofilm transforme les déchets

Enchâssées dans une matrice de nanotubes de carbone, des bactéries décomposent la matière organique pour fabriquer du bio-hydrogène.

incorporées dans la partie inerte. Elles influencent la croissance et l'architecture intime des produits finaux, ce qui confère à ces derniers des propriétés inédites calquées sur les grandes fonctions du vivant », souligne Mathieu Étienne, chercheur au Laboratoire de chimie physique et microbiologie pour les matériaux et l'environnement, à Nancy (Meurthe-et-Moselle). Ces matériaux hybrides artificiels peuvent ainsi s'auto-organiser, s'autoréparer, produire une kyrielle de molécules. Ou encore réagir aux modifications de leur environnement, comme dans les façades développées à l'université de Newcastle.

« *Aujourd'hui les financements affluent et le secteur explose* », se réjouit Bao-Lian Su. Pour preuve, les publications scientifiques ont été multipliées par dix entre 2017 et 2021, passant d'une petite trentaine à plus de 300. « *Cette accélération s'explique par les progrès récents et faramineux de la biologie de synthèse, qui manipule le génome des cellules et leur confère toujours plus précisément les propriétés que l'on souhaite.* ▸

NEWCASTLE UNIVERSITY



BRUNO BOURGEOIS

Cette chercheuse de l'université de Newcastle (Royaume-Uni) prépare des lamelles composées de latex et de spores bactériennes. Celles-ci se dilatent et s'incurvent (schéma) quand l'humidité dépasse un certain seuil, créant ainsi des sortes de « pores ».

Mais, aussi, par des collaborations de plus en plus étroites entre biologistes et experts en sciences des matériaux », analyse l'Américain Wil Srubar. Spécialisé en ingénierie structurale, il a créé en 2015 le Laboratoire pour les matériaux vivants à l'université du Colorado à Boulder (États-Unis). Et a recueilli, depuis lors, près de 13 millions de dollars pour divers projets de recherche. Début 2020, sous l'égide de l'armée américaine *(lire l'encadré p. 63)*, son équipe a ainsi conçu une sorte de mortier capable de s'autorépliquer. Il est composé de cyanobactéries (du genre *Synechococcus*) qui sécrètent du carbonate de calcium, ingrédient de base du ciment. Ces micro-organismes ont été mélangés à des nutriments, de la gélatine et du sable. Tandis que la gélatine sert de support à la croissance bactérienne, le carbonate de calcium minéralise l'ensemble qui durcit peu à peu. Résultat : en une demi-douzaine d'heures seulement, on obtient des briques aussi résistantes que du béton ! Il suffit alors de scinder l'une d'elles et d'ajouter dans un moule de la gélatine et du sable pour que la croissance bactérienne reprenne et produise deux nouvelles briques, celles-ci pouvant ensuite être divisées pour en former quatre, huit, seize, etc. Une start-up (Prometheus Materials) a déjà été créée pour développer cette technologie. Et une usine pilote devrait être construite d'ici à la fin de 2022.

Des microalgues fabriquent des médicaments 24 h sur 24

Preuve que la branche se structure, un premier congrès international (intitulé Living Materials) a été organisé en février 2020 à Sarrebruck (Allemagne). *« Très pluridisciplinaire, il a réuni plus de 120 microbiologistes, chimistes, physiciens et ingénieurs ainsi que des industriels, alors même que les Asiatiques n'avaient pu participer en raison de l'épidémie de coronavirus,* rapporte Bao-Lian Su. *On sentait un vif enthousiasme, un besoin très fort de partager les nouveaux acquis.* »

Le scientifique namurois a présenté à cette occasion Algae Factory, le projet européen qu'il coordonne. Celui-ci tire profit des propriétés photosynthétiques de microalgues marines (de type *Dunaliella tertiolecta*) — qui, en présence d'eau, de lumière et de dioxyde de carbone, fabriquent des molécules organiques — pour en faire… des usines à médicaments ! Les microalgues sont encapsulées dans une matrice poreuse de silice et d'alginates, polymères biocompatibles et très malléables. Installé dans un photobioréacteur, l'hydrogel qui en résulte fabrique ainsi, 24 heures sur 24, divers produits pharmaceutiques à haute valeur ajoutée, comme des molécules antioxydantes, antibiotiques ou anti-

LÉGISLATION

Des questions éthiques et de biosécurité

Les matériaux vivants soulèvent d'importantes problématiques sociétales. *« Qu'ils soient d'origine bactérienne, végétale ou animale, la plupart des organismes incorporés dans ce type de matériaux ont été profondément modifiés*, souligne Mathieu Étienne, chimiste à Nancy. *Des réflexions devront donc être menées par les comités d'éthique et le législateur afin de déterminer quelles recherches et applications peuvent ou non être conduites et généralisées. »* Des normes devront également être établies afin de garantir leur innocuité totale. *« Nous sommes très attentifs aux implications éthiques et légales, notamment l'impact sur l'environnement si ces organismes devaient être utilisés dans la vie quotidienne »*, signale pour sa part Blake Bextine, biologiste travaillant pour l'armée américaine.

APPLICATION

L'armée américaine bâtit sur du sable

La Darpa, l'Agence pour les projets de recherche avancée de l'armée américaine, s'intéresse de près aux matériaux vivants d'ingénierie. Elle a lancé, dès 2016, l'Engineered Living Materials Program qui entend « *révolutionner la logistique et les constructions militaires dans des environnements lointains, austères, à haut risque ou frappés par des catastrophes naturelles* », explique Blake Bextine qui pilote ce programme. Parmi les recherches que la Darpa a financées, des briques qui s'auto-répliquent de manière exponentielle, composées de cyanobactéries et mises au point à l'université du Colorado. « *Cette technologie, quasi mature, devrait profiter tant au secteur militaire que privé* », précise le biologiste. Elle permettra de construire des baraquements sur des théâtres lointains « *sans avoir à acheminer des tonnes de matériaux puisque ces derniers "pousseront" directement sur le site.* » Autre exemple avec le projet Medusa, en référence au monstre mythologique qui transformait ses victimes en pierre. Il consiste à créer des pistes d'atterrissage éphémères en semant sur du sable des bactéries et des nutriments qui durcissent très fortement l'ensemble. Le procédé a été testé avec succès en juillet 2021 sur l'île de Guam (océan Pacifique), permettant de faire atterrir des hélicoptères et des avions à rotors basculants CV-22.

ALAMY STOCK PHOTO12

Cette piste d'atterrissage a été créée en semant des bactéries et nutriments sur le sable pour le faire durcir (ici le procédé testé sur l'île de Guam dans l'océan Pacifique).

cancéreuses. « *Le procédé devrait être mature d'ici cinq à six ans* », estime Bao-Lian Su.

Présent lui aussi à Sarrebruck, Mathieu Étienne a détaillé d'autres applications potentielles, dans les secteurs des énergies renouvelables et de l'environnement. Son équipe exploite diverses bactéries telle *Shewanella oneidensis* dont le métabolisme expulse des charges électriques négatives (électrons). En enchâssant ces microbes dans un réseau de nanotubes de carbone (qui captent et transportent les électrons), elle fabrique ainsi des biofilms électro-actifs possédant de fascinantes propriétés. Déposés sur des environnements pollués, ils détruisent les nitrates d'origine agricole grâce à des réactions chimiques d'oxydoréduction. Appliqués sur des déchets alimentaires, ils décomposent la matière organique et produisent du bio-hydrogène servant lui-même à alimenter des piles.

Si les débouchés ne manquent pas, plusieurs défis doivent être encore surmontés pour passer à l'étape industrielle

Si les débouchés ne manquent pas, plusieurs défis doivent encore être surmontés pour passer à l'étape industrielle. À commencer par « *la viabilité et le maintien des cellules sur le long terme* », insiste Wil Srubar. Les éléments inertes avec lesquels celles-ci doivent cohabiter sont en effet très différents de leur environnement naturel. Les cellules subissent des stress considérables qui réduisent plus ou moins drastiquement leur longévité. « *Nos microalgues ne vivent guère plus d'une année,* reconnaît Bao-Lian Su. *Sans compter que leur efficacité décline fortement avec le temps.* » Pour améliorer les conditions de vie des cellules, les chercheurs se concentrent, en particulier, sur les structures qui les enveloppent et les protègent des conditions extérieures : elles ne doivent pas être trop épaisses, sans quoi les organismes se retrouvent isolés et meurent, ni trop fragiles car elles seraient alors rapidement dissoutes. L'architecture globale joue, elle aussi, un rôle décisif. « *Nous devons identifier et optimiser les maillages qui permettent une bonne communication entre les cellules, le transport des nutriments et l'élimination des déchets issus du métabolisme,* précise Bao-Lian Su. *Comme dans les structures osseuses, les coraux ou les feuilles des arbres au demeurant, matériaux vivants naturels qui constituent notre meilleure source d'inspiration.* » ■

Franck Daninos
@fdaninos

MEINRAD SCHADE/LAIF-REA

Ces ventilateurs géants, mis au point par la société Climeworks (ici à Hinwil, en Suisse), aspirent l'air ambiant et retiennent le dioxyde de carbone qui peut ensuite être recyclé dans l'industrie (boissons gazeuses) ou enfoui dans le sous-sol.

Capter le CO_2

Des aspirateurs pour purifier l'atmosphère

L'idée de retirer de l'atmosphère du dioxyde de carbone fait son chemin : le suisse Climeworks et le canadien Carbon Engineering ont commencé à installer des usines innovantes. Pour le Giec, cette approche pourrait même permettre à l'humanité de rester en dessous des 1,5 °C d'augmentation de la température mondiale depuis les débuts de l'ère industrielle. Réaliste ?

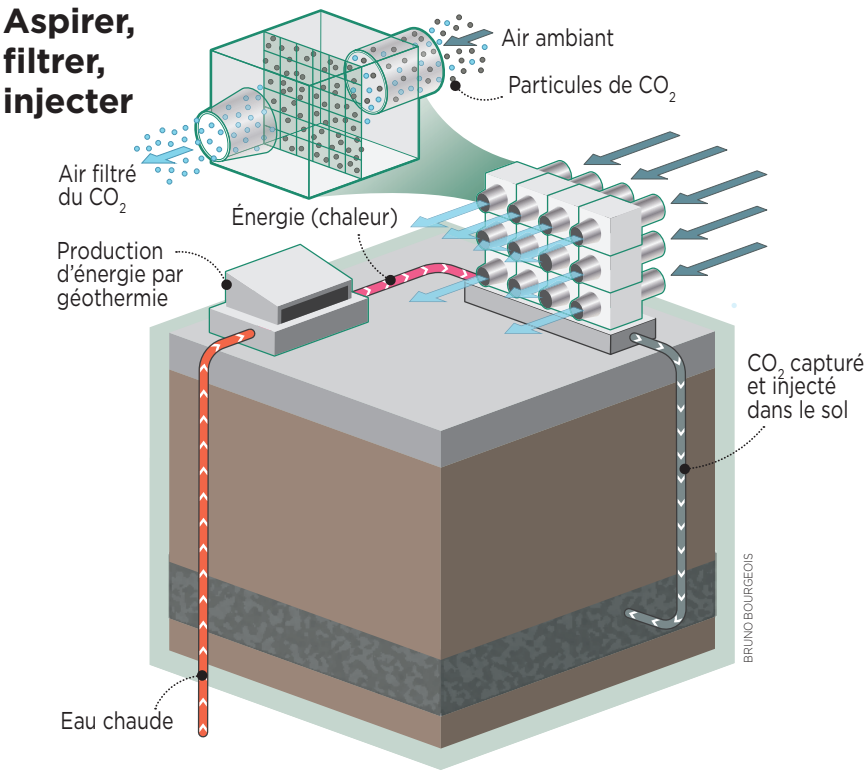
Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

L'idée peut paraître simpliste : puisque les activités humaines ont conduit à faire exploser les concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, pourquoi ne pas le retirer et enfouir tout ce carbone sous terre ? Si dans les faits l'opération est complexe, universitaires et industriels s'y intéressent néanmoins de plus en plus. Les travaux se multiplient, aiguillonnés par les conclusions des rapports du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (Giec) : oui, la capture directe dans l'air (DAC selon l'acronyme anglais) pourrait aider l'humanité de rester en dessous des 1,5 °C d'augmentation de la température mondiale depuis les débuts de l'ère industrielle.

L'œil sombre et le ton assuré, Christoph Beuttler a arpenté les couloirs de la COP26 à Glasgow (Royaume-Uni) début novembre pour pousser ses pions. Le chef de la politique climat de la société Climeworks est venu vendre la technologie développée en Suisse. Les photos de ses énormes ventilateurs aspirant l'air intriguent. Il y aurait donc une technique pour faire baisser les 415 parties par million (molécules de CO_2 dans un mètre cube d'air) qui ont déjà généré une hausse globale de 1,1 °C ? *« Les deux fondateurs de la société, Christoph Gebald et Jan Wurzbacher, ont mis au point en 2009 un matériau qui ne capte que le CO_2 et qu'ils ont breveté. Leur société est un* spin-off, *une émanation de l'École polytechnique fédérale de Zurich* », raconte Christoph Beuttler.

Le principe : d'énormes ventilateurs aspirent l'air, le font passer à travers ce matériau solide qui capte le CO_2, et c'est un souffle appauvri en carbone qui

ressort. La nature exacte de ces filtres relève du secret industriel. *« On dispose néanmoins de quelques informations,* précise Sylvain Delerce, chercheur au CNRS, à Toulouse, et spécialiste de la minéralisation du carbone. *Ce matériau est composé de nanofibres de cellulose couplées à des amines [des molécules dérivées de l'ammoniac].* »
Quand ils arrivent à saturation, les filtres sont isolés et chauffés à environ 100 °C pour provoquer le relargage du CO2 pur et la régénération du matériau. Le CO_2 est ensuite comprimé et acheminé soit à une unité industrielle qui le recyclera, soit enfoui dans des couches géologiques profondes. *« L'idée est intéressante parce qu'elle abaisse la teneur en CO_2 directement dans l'air au contraire de la capture-stockage de carbone à la sortie des cheminées des usines qui, elle, ne fait qu'éliminer à la source un carbone qui allait partir dans l'atmosphère »*, juge Olivier Boucher, directeur adjoint de l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL).



L'air ambiant est aspiré par des ventilateurs équipés de filtres dotés d'un matériau solide qui ne fixe que le CO_2. Ce dernier est ensuite enfoui dans le sol. La capture directe dans l'air n'a d'intérêt que si le bilan carbone est négatif. Climeworks a prévu d'alimenter son système par une source d'énergie renouvelable, ici la géothermie.

Le CO_2 capté est minéralisé dans du basalte en Islande

Depuis 2009, Climeworks a construit 15 unités qui alimentent les procédés industriels de leurs utilisateurs. *« Par exemple, la filiale suisse de Coca-Cola utilise le CO_2 extrait pour gazéifier ses sodas »*, raconte Christoph Beuttler. Une démarche engagée dans un contexte d'urgence climatique car le gaz de Climeworks coûterait autour de 500 euros la tonne, soit plus de dix fois les tarifs du marché ! Microsoft, Audi, la plateforme de commerce Shopify ont souscrit des contrats pour compenser leurs émissions. Les particuliers peuvent le faire également avec des tarifs allant de 13 à 49 euros par mois qui ouvrent à l'effacement de 600 kg de CO_2 par an (à titre de comparaison, un Européen en émet autour de 10 tonnes par an). Une démarche qui a déjà séduit 10 000 personnes. Christoph Beuttler est pour le moins ambitieux : *« Nous visons le milliard d'adhérents dès la prochaine décennie car il faudra augmenter l'effort pour ne pas aller au-delà de 1,5 °C. de réchauffement planétaire. »*
La quantité de CO_2 captée dans l'air dépassera tous les besoins industriels comme la fabrication de l'urée, substance de base des plastiques polymères et polycarbonates. Aussi, il faudra lui trouver une autre destination. C'est déjà chose faite avec l'usine Orca en Islande, mise en service en septembre 2021. Le CO_2 capté y est en effet enfoui dans les couches profondes de basalte, roche volcanique qui compose l'essentiel du sous-sol de l'île. Ce programme scientifique baptisé Carbfix a prouvé l'efficacité de cette roche à absorber le CO_2 pour des milliers d'années. *« L'idée est de dissoudre le CO_2 dans de l'eau et d'in-*

COP26

Le système de la compensation carbone est lancé

La COP26 a adopté les règles du marché carbone. Le CO_2 séquestré peut désormais être acheté par des pays émetteurs, des entreprises ou des collectivités qui veulent respecter leur quota ou compenser leurs émissions. Sans ce marché, le captage du CO_2 dans l'air n'est pas aujourd'hui économiquement rentable. Mais son avantage est de permettre une comptabilité précise des tonnes enfouies, au contraire de la plantation d'arbres par exemple.

jecter ce mélange dans les couches profondes. Il y réagit avec le basalte, ce qui transforme le gaz en carbonates solides. Et ce, en moins de deux ans », détaille Sylvain Delerce, qui a participé à ce consortium regroupant universités et sociétés privées. Une des limites de cette solution est qu'elle requiert d'importants volumes d'eau douce. « *Mais des travaux récents de l'université d'Islande montrent que cette minéralisation s'effectue aussi avec de l'eau salée, et comme le plancher océanique est principalement constitué de basalte, il devient possible d'envisager des sites d'enfouissement sous les mers* », assure Sylvain Delerce. Ce qui sera nécessaire pour changer d'échelle : Orca ne récupère que 4000 tonnes par an quand les émissions anthropiques pèsent 40 milliards de tonnes.

Une batterie au CO_2 conçue par des chercheurs du MIT

Aujourd'hui Climeworks a pour seul concurrent le canadien Carbon Engineering, qui, lui, fait appel aux mêmes solvants aminés qui servent dans les systèmes de capture à la sortie des usines. Une technique plus énergivore car, pour extraire le CO_2, il faut chauffer le solvant à 900 degrés. Surtout, pour l'heure, cette approche sert à réinjecter le CO_2 compressé dans les puits de pétrole afin d'en extraire les dernières gouttes. D'où un bilan carbone très mauvais qui a été dénoncé lors des débats menés sur le sujet à la COP26. De son côté, Climeworks avance, au contraire, que ses installations sont exclusivement alimentées par des énergies renouvelables.

D'autres solutions sont à l'étude. « *La recherche grouille d'idées novatrices* », s'enthousiasme Sylvain Delerce. Ainsi la société Heirloom, créée par des professeurs d'universités américaines, propose de laisser réagir naturellement à l'air de l'oxyde de magnésium pour absorber naturellement le CO_2. La réaction formera de la magnésite qui est ensuite calcinée à environ 600 °C pour en extraire le CO_2 pur, ce qui régénère l'oxyde de magnésium, prêt pour un nouveau cycle. Heirloom vise le captage d'un milliard de tonnes de CO_2 en 2035.

40 milliards de tonnes/an
Les émissions provenant des activités humaines.

19 milliards de tonnes/an
Le CO_2 en excès qui s'accumule dans l'atmosphère.

Une autre voie a été proposée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge, États-Unis). « *Les chercheurs ont conçu une sorte de batterie qui capte le CO_2 en mode charge et le relargue en mode décharge,* explique Sylvain Delerce. *Le procédé, qui ne consomme que de l'électricité, réclame six fois moins d'énergie par tonne de CO_2 captée que les processus actuels.* » Le MIT envisage d'autres applications pour le CO_2, comme la synthèse de kérosène de synthèse pour les avions.

Pour tous ces acteurs, le captage du CO_2 dans l'atmosphère est le moyen de résoudre le problème des émissions de l'humanité afin d'atteindre l'objectif de la coalition mondiale de 131 pays des Nations unies d'arriver en 2050 au « zéro émission nette ». Et un nouvel acteur pourrait prochainement bouleverser ce secteur émergent : le milliardaire américain Elon Musk a lancé une compétition pour la meilleure technologie de captage du CO_2, avec 100 millions de dollars à la clé. ■

BIOMASSE

Enrichir les terres agricoles tout en captant le CO_2

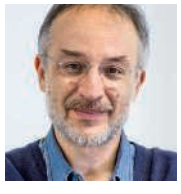
À 150 km de Douala (Cameroun), Nkongsamba pourrait bien rester dans l'histoire climatique comme le point de départ du « biochar ». Il s'agit d'un produit carboné destiné à enrichir les terres agricoles et dont la fabrication permet de retirer du CO_2 de l'atmosphère. Sa production par la société NetZero a démarré en septembre. Elle se fait par pyrolyse, en chauffant la biomasse en atmosphère privée d'oxygène, ce qui produit un ensemble de méthane (la molécule principale), d'hydrogène, de monoxyde de carbone qui sert en retour à alimenter les brûleurs du four à pyrolyse, si bien que le système est énergétiquement autonome. Les gaz de pyrolyse en excès permettent même de générer de l'électricité. Le biochar est le nom donné aux résidus. Ainsi, une tonne de biomasse produit de 250 à 300 kg de biochar, soit une captation de 400 à 450 kg de CO_2. Mélangé à la couche superficielle du sol, l'élément carboné augmente durablement la fertilité et surtout est ôté de l'atmosphère pour plusieurs siècles. À Nkongsamba, les 10 000 tonnes brûlées par an proviennent des écorces de graines de café qui pourrissaient jusque-là au bord des champs. Cette capacité permet d'exploiter ces déchets agricoles dans un rayon de 10 km. Et ce sont les agriculteurs locaux qui repartent avec le biochar pour amender à bas coût leurs champs. Le marché est vertigineux : l'Afrique produit 1 milliard de tonnes de déchets verts inutilisés, la ceinture tropicale mondiale 2 milliards. Convertis en biochar, ces résidus pourraient réduire de 10 % les 4 milliards de tonnes de CO_2 que l'humanité ne pourra éviter d'émettre en 2050.

STEFANO MANCUSO
NEUROBIOLOGISTE VÉGÉTAL

« Une constitution pour le monde végétal »

Stefano Mancuso, neurobiologiste végétal défenseur du concept controversé de l'intelligence des plantes, publie un plaidoyer : « Nous, les plantes ». Dans cet ouvrage où il fait appel aussi aux sciences sociales, il leur accorde le statut de nation, et propose une constitution qu'elles auraient rédigée afin d'inspirer aux humains une meilleure façon de vivre ensemble. Rencontre.

S. et A. : Dans votre livre vous érigez les plantes au rang de nation : que nous échappe-t-il de leur univers qui motive une telle prise de position, aux allures de manifeste ?
Stefano Mancuso : Je suis convaincu de notre totale incapacité à saisir les rouages essentiels de la vie, le fonctionnement d'une communauté d'êtres vivants qui, elle, ne pèche pas par présomption. J'étudie les plantes depuis trente ans. Mes publications scientifiques ont progressivement démontré les capacités cognitives — de perception, d'apprentissage, de mémorisation et de communication — dont elles font preuve. Compétences que l'on estimait auparavant être l'apanage du monde animal. Or nous ignorons ces qualités et de surcroît restons aveugles à la certitude que les plantes sont les garantes de la survie de notre espèce sur la planète : nous leur devons tout bonnement l'oxygène que nous respirons. Nous devrions éprouver du respect à l'égard de ces formes de vie prodigieuses et inspirantes et prendre enfin conscience du fait que nous, les animaux, représentons à peine 0,3 % de la biomasse, contre 85 % pour les plantes.
Dans un premier temps, je ne parvenais pas moi-même à accepter notre insignifiance, à intégrer l'évidence que les végétaux existent sur Terre depuis bien plus longtemps que nous, qu'ils sont incommensurablement plus nombreux et qu'ils ont démontré une incroyable réussite adaptative. Rien que pour cela, nous pourrions les considérer comme une superpuissance, et nous, un simple accident de l'évolution !


A. BOSCOLO AGOSTINI

« Les plantes nous prouvent en matière de longévité et de succès sur Terre que leurs choix sont meilleurs que les nôtres »

Mais de là à proposer une constitution écrite par les plantes à l'usage des humains il y a une marge…
Oui, j'ai franchi un cap. Je me suis rendu compte que la manière dont les plantes se comportent, en tissant des relations vertueuses entre elles et avec leur environnement, figurait un mode de vie exemplaire, et que nous devrions en prendre de la graine. J'ai cherché un expédient narratif qui me permette de faire comprendre comment ces êtres normalement perçus comme plus proches de l'inorganique pourraient nous guider, en imaginant qu'ils rédigent une constitution.

En quoi celle-ci serait-elle différente, et à vos yeux plus digne, par rapport aux nôtres ?
Les nôtres présentent toutes un point commun : leur centre d'intérêt est l'humain, il trône en seigneur absolu. Nos règles fondamentales du vivre ensemble y convergent comme si, une fois nos propres modes d'interaction établis, le tour était joué. C'est l'un des grands fourvoiements de notre temps. Nos constitutions ne mentionnent que trop

SOPHIE ZÉNON

Les espèces végétales coopèrent et pratiquent la symbiose, loin des rapports de domination et de prédation que les humains entretiennent avec la nature.

BIO EXPRESS

- **1965 :** Naissance à Catanzaro, en Italie.
- **2001 :** Professeur à l'université de Florence.
- **2005 :** Crée le Laboratoire international de neurobiologie végétale.
- **2009 :** Premier scientifique à mettre en évidence des équivalents d'influx nerveux spontanément produits dans l'extrémité des racines, similaires à ceux produits par le cerveau humain.
- **2014 :** Fonde PNAT, start-up spécialisée dans le biomimétisme végétal.
- **2018 :** Publie *L'Intelligence des plantes*, coécrit avec Alessandra Viola (Albin Michel).
- **2021 :** Publie *Nous les plantes* (Albin Michel).

rarement la nature, l'environnement, les autres êtres vivants, alors même que si nous les oublions, la cohabitation entre les humains ne peut marcher. La vie ne peut en aucun cas se résoudre à des rapports de domination et de prédation, que notre langage même reflète : nous ne parlons plus d'arbres mais de bois, pas d'animaux mais de bétail, ni de poissons mais de prises de pêche. À quoi cela nous a-t-il conduits ? À léguer aux générations futures une planète épuisée, envahie de déchets, théâtre d'une extinction dramatique des espèces. Moi je propose de déplacer le curseur de l'humain vers le végétal et le vivant tout entier.

Votre argumentaire procède en effet par comparaison humain/végétal, dont ce dernier sort toujours vainqueur…

Si l'objectif de la vie est la survie de l'espèce, les plantes nous prouvent en matière de longévité et de succès sur Terre que leurs choix sont meilleurs que les nôtres. Pourquoi nous est-il impossible de projeter la survie de notre espèce au-delà de 100 000 ans, alors que l'on compte en centaines de millions d'années pour les autres, animales ou végétales ? Simplement parce que nous avons, à une échelle de temps démesurément brève, bouleversé de façon irrémédiable notre propre milieu de vie. Le vivant est organisé en communautés agissantes, dont chaque élément compte pour préserver un équilibre global. Son intérêt est qu'il soit gardé : nous, nous l'avons rompu. Exporter des espèces hors de leur milieu d'origine sans tenir compte de répercussions délétères, ou en exterminer d'autres sans se préoccuper d'interactions bénéfiques ainsi annihilées, c'est inepte. Tandis que nous polluons les sols, les plantes s'ingénient à les purifier. Elles fonctionnent par coopération et symbiose plutôt que par une compétition effrénée, elles parviennent à modifier jusqu'à leur anatomie afin d'adapter leurs niveaux de consommation et de croissance aux ressources disponibles. Et leur corps tout entier, dans lequel les fonctions vitales sont distribuées en l'absence d'élément hiérarchique central, représente à mes yeux un exemple merveilleusement abouti et efficace d'une organisation horizontale que nos démocraties mêmes devraient envisager. ■

Propos recueillis par Andreina De Bei

ABACAPRESS.COM

Traitements oraux, le Paxlovid (Pfizer) et le monulpiravir (Merck) doivent être administrés durant cinq jours dès l'apparition des premiers symptômes de Covid-19.

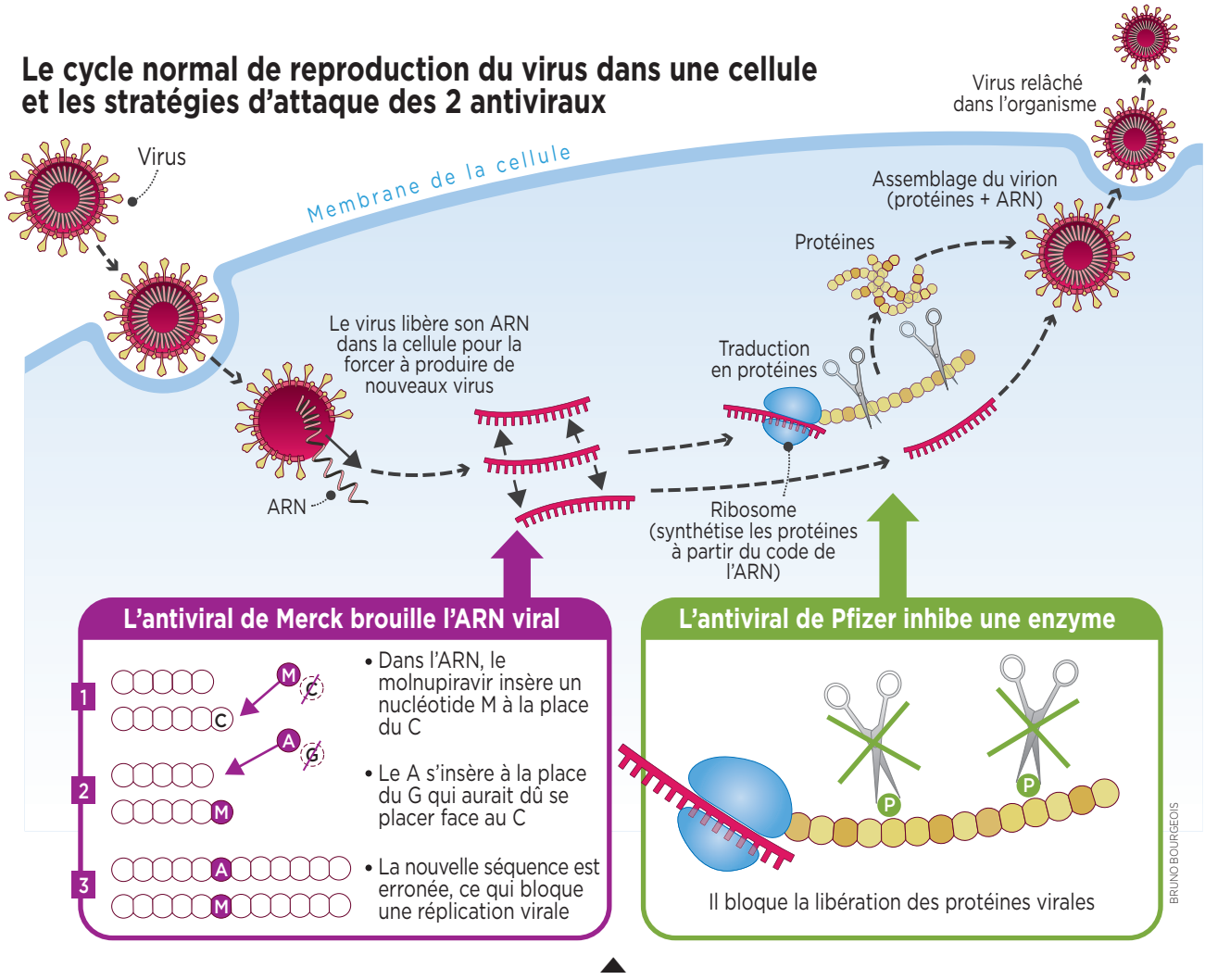
Antiviraux

Une nouvelle arme contre le Covid-19

Alors que le variant Omicron replonge la planète entière dans l'incertitude sur l'évolution de la pandémie de Covid-19, un nouvel espoir arrive avec des traitements antiviraux innovants. Ces médicaments permettraient de faire chuter les hospitalisations et les décès, notamment dans les régions du monde où l'accès aux vaccins est difficile. Ils pourraient même être efficaces, au-delà de la crise actuelle, contre la grippe ou d'autres infections par des virus à ARN.

Par Pierre Kaldy

« Game changer » : c'est ainsi que les Anglo-Saxons évoquent une rupture majeure. En bon français, il convient de parler de « changer la donne ». Et c'est ce que promettent plusieurs antiviraux dans la lutte contre le virus Sras-CoV-2. Ils permettent, pris cinq jours d'affilée après les premiers signes d'infection, d'éliminer le virus de l'organisme si l'on n'a pas encore été vacciné. Comme ceux qui guérissent de l'hépatite C ou bloquent le virus du sida, ces antiviraux, dits à action directe, ciblent des enzymes du virus cruciales pour son développement dans la cellule. Deux sont déjà en voie de commercialisation, le molnupiravir et le Paxlovid, respectivement des laboratoires américains Merck et Pfizer. Testés sur des centaines de personnes en début d'infection et à risque élevé de complications, ils réduisent le risque d'hospitalisation pour les patients traités et écartent tout risque de décès. *« Point notable,* précise Étienne Simon-Lorière, virologue à l'Institut Pasteur, *ils peuvent bloquer tous les variants du Sras-CoV-2 car ils agissent au cœur de la machinerie virale et non sur des éléments de surface du virus. »* Le molnupiravir avait une longueur d'avance. Son histoire est en effet bien antérieure à la déclara-



Les deux traitements perturbent la multiplication du virus dans l'organisme, mais leur mode d'action diffère. Le **molnupiravir (Merck)** provoque des mutations de l'ARN viral et le rend illisible. Le **Paxlovid (Pfizer)** bloque l'activité d'une protéine commune à tous les coronavirus, une enzyme dont le virus a besoin pour se répliquer.

tion faite par la Chine à l'Organisation mondiale de la santé de cas de pneumonies virales atypiques à la fin de l'année 2019. Les scientifiques le connaissaient comme la forme orale d'un puissant antiviral (β-D-N^4-hydroxycytidine), découvert en 2002 par des chercheurs américains de l'université Emory, à Atlanta, pour sa capacité à bloquer le virus de l'hépatite C *in vitro*. Cet antiviral est un analogue de la cytidine (C), un des quatre composants formant l'ARN, le patrimoine génétique du virus. Il est capable, en prenant la place de ce composant lors de la fabrication de l'ARN viral, de brouiller son message et de rendre sa lecture chaotique lorsqu'il est répliqué par l'enzyme du virus, l'ARN polymérase *(voir l'infographie ci-dessus)*. En 2018, d'autres chercheurs de l'université Emory découvrent qu'il stoppe net la grippe chez divers animaux sans montrer aucune toxicité, et que le virus n'arrive pas, même en mutant, à contourner son blocage. En 2019, la même équipe modifie légèrement la molécule pour la rendre aussi active prise oralement chez l'être humain : le molnupiravir est né.

Fin janvier 2020, au moment où l'OMS déclare l'épidémie de Covid-19 « *urgence de santé publique de portée internationale* », toutes les attentes se tournent vers la mise au point d'un vaccin qui protégerait la planète. De son côté, un couple d'investisseurs américains, Wendy et Wayne Holman, réalise tout le futur potentiel que pourrait avoir le molnupiravir, pour stopper les infections. Il contacte le centre de recherche où il a été développé, l'Emory Institute for Drug Development (EIDD), lui achète en mars 2020 la licence du

produit au travers de sa société Ridgeback Therapeutics, et finance immédiatement les premiers essais cliniques contre le Sras-CoV-2. En avril, le géant pharmaceutique Merck repère aussi le molnupiravir et propose à Ridgeback Therapeutics de lui racheter la licence, au moment où le premier essai clinique montre déjà qu'il est bien supporté par l'organisme humain. En juin, un premier essai thérapeutique portant sur 200 personnes infectées par le Sras-CoV-2 est mis en place en Grande-Bretagne, financé par Ridgeback Therapeutics puis par le laboratoire Merck. Ses résultats révèlent pour la première fois que le molnupiravir élimine le virus chez tous les patients traités, contrairement au groupe placebo.

10 millions de traitements fabriqués en 2021

Cette démonstration, acquise en un temps record grâce aux efforts du couple Holman et des autorités sanitaires et scientifiques britanniques, permet d'engager en octobre 2020 un vaste essai clinique du molnupiravir sur des personnes infectées et présentant au moins un facteur de risque de complications (obésité, diabète, plus de 60 ans…). Un an plus tard, son action s'avère là encore très convaincante : elle réduit de moitié les risques d'hospitalisation et évite tout décès chez les patients traités comparés au groupe placebo. Ces résultats préliminaires, annoncés uniquement à travers un communiqué de presse, ont fait interrompre la poursuite de l'essai pour des raisons éthiques (un essai clinique devant être mené avec le meilleur traitement connu pour le groupe témoin). Prenant alors les devants, le gouvernement américain a sorti son carnet de chèque dès juin 2021 pour acheter 1,7 million de traitements de cinq jours à 712 dollars l'unité au cas où le produit serait autorisé, puis à faire en novembre une nouvelle commande de 1,4 million de traitements. De son côté, Merck a déjà fabriqué 10 millions de traitements en 2021 dans 17 usines de huit pays et aura la capacité d'en produire plus du double en 2022. Le laboratoire a aussi accordé des licences de fabrication du médicament à moindre coût à destination de 105 pays en développement, avec l'engagement de ne percevoir aucun droit tant que l'OMS jugera le Covid-19 une « urgence de santé publique de portée internationale ». De nombreux fabricants de génériques, dont plusieurs en Inde, ont commencé à le produire, d'autant que sa synthèse chimique est facile à réaliser. Début novembre 2021, le Royaume-Uni est le premier pays à autoriser la commercialisation de l'antiviral baptisé Lagevrio pour les personnes infectées à risque et a acheté 480 000 traitements. Quelques pays, dont la France, ont aussi passé commande du produit durant l'année 2021 et certains l'utilisent déjà à titre dérogatoire dans les hôpitaux. Las, les résultats complets de l'étude clinique du molnupiravir annoncés fin novembre s'avèrent plus décevants : la baisse des hospitalisations n'est que de 30 % et un décès n'a pu être évité. Conséquence : en 2022, le produit pourrait être rapidement rattrapé par son concurrent le plus sérieux, le Paxlovid de Pfizer.

DÉCRYPTAGE

Les fausses pistes initiales

Chloroquine, remdésivir, favipiravir : que ce soit de la part de la Chine, des États-Unis ou du Japon, les espoirs de « repositionner » des antiviraux connus ont été aussi forts que déçus. Pour les patients hospitalisés traités à l'hydroxychloroquine, le bilan d'une vingtaine d'essais cliniques menés en 2020 a fini par montrer une légère surmortalité. Le produit est sans effet en début d'infection et chez les personnes qui l'utilisent déjà pour traiter un lupus érythémateux ou une polyarthrite rhumatoïde. Le remdésivir, premier antiviral autorisé aux États-Unis en 2020 pour des patients hospitalisés et sous oxygène n'a pas montré d'efficacité notable, au-delà de son coût et de ses effets indésirables. Quant au favipiravir, développé au Japon, où il est autorisé depuis 2014 contre une grippe non saisonnière, il ne bloque pas les coronavirus *in vitro* et a des effets indésirables.

AGEFOTOSTOCK

Le remdésivir n'a montré aucune efficacité notable chez les patients sous oxygène.

F.GARDY /INSTITUT PASTEUR

« Fait notable : ces deux antiviraux peuvent bloquer tous les variants du Sras-Cov-2 »

Étienne Simon-Lorière,
virologue à l'Institut Pasteur

BRUNO CANARD SPÉCIALISTE DES CORONAVIRUS AU CNRS

« Il faudra combiner des traitements pour avoir des effets plus marqués »

“Les antiviraux qui vont être mis sur le marché, assortis d'un diagnostic précoce et fiable en cas d'exposition avérée au virus, pourraient sauver des vies chez les patients ayant de fortes chances de faire des complications. D'autant plus que, comme dans le cas du VIH et de l'hépatite C, nous sommes dans la phase initiale de développement d'antiviraux. La deuxième phase sera de pouvoir combiner des molécules afin d'avoir des effets plus marqués sur le contrôle viral. Rappelons-nous les années 1987-1990, quand il n'y avait presque que la zidovudine [l'AZT, premier inhibiteur nucléosidique du VIH], les gens mourraient du sida. En 1995, l'association de trois médicaments (trithérapie) a fait chuter brutalement la mortalité chez les patients traités. Même chose avec l'arrivée des traitements modernes de l'hépatite C qui ont remplacé les régimes d'interféron-ribavirine de 12 mois et environ 40 % d'efficacité par des bithérapies de trois mois et un taux de guérison supérieur à 90 %.”

VALENTINE VERMEIL POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

En effet, en novembre 2021 le laboratoire pharmaceutique américain a annoncé des résultats préliminaires bien meilleurs pour son antiviral testé dans un vaste essai clinique avec placebo et lui aussi interrompu pour les mêmes raisons éthiques. Son mécanisme d'action est différent : il bloque une enzyme majeure des coronavirus, une protéase qui libère toutes les protéines du virus dans la cellule. Cet inhibiteur (ex-PF-07321332) est combiné au ritonavir, un antiviral contre le virus du sida faiblement dosé, qui limite sa dégradation par le foie. *« Contrairement au molnupiravir, il découle directement de recherches menées en 2003 par Pfizer contre le Sras-CoV, virus très proche du Sras-CoV-2, puis abandonnées quand son épidémie a pu être contenue, ce qui explique sa mise au point en un temps record de quelques mois »*, précise Étienne Simon-Lorière. Sans effets indésirables notables chez les patients, il a d'emblée fait l'objet d'une commande de 10 millions de traitements pour près de 5,3 milliards de dollars par le gouvernement américain, sous réserve, là encore, qu'il soit approuvé. Pfizer a également accordé les mêmes facilités de fabrication que son concurrent pour les pays en développement. En plus de son efficacité, il présente le sérieux avantage, par rapport au molnupiravir, de ne pas interférer avec du matériel génétique mais uniquement avec une protéine virale commune à tous les coronavirus *(voir l'infographie p. 72)*.

Merck et Pfizer ne sont pas les seuls à partir à l'assaut des antiviraux oraux contre le Sras-CoV-2, même si les concurrents sont à cette heure peu nombreux. Le plus avancé en évaluation clinique est l'AT-527 de la société américaine Atea Pharmaceuticals, fondée par le chercheur français Jean-Pierre Sommadossi. Lui aussi peut bloquer directement la synthèse de l'ARN des coronavirus et n'a pas montré de pouvoir mutagène. Les résul-

INNOCUITÉ

Le molnupiravir, une molécule mutagène ?

Le molnupiravir peut s'introduire dans l'ADN des cellules en division et y provoquer des mutations, affirme une expérience publiée en mai 2021. Cette publication a fait planer un sérieux doute sur son innocuité. Reste que le protocole est très différent d'une thérapie sur cinq jours : il a testé des cellules qui avaient proliféré pendant un mois avec l'antiviral. De leur côté, les chercheurs de l'Emory Institute for Drug Development (États-unis) qui ont développé le traitement n'ont, pour leur part, décelé aucune mutation chez plusieurs espèces d'animaux exposés à de fortes doses du produit. Dans tous les cas, il ne devra pas être pris en cas de projet parental ou de grossesse et sera réservé aux personnes à haut risque de Covid-19 sévère.

tats de son premier essai clinique d'envergure, qui a dû être relancé après une erreur de conception initiale, ne seront connus qu'au premier semestre 2022. Les antiviraux par voie orale ne sont cependant pas le premier traitement pour stopper la maladie : ils viennent se mesurer aux anticorps déjà commercialisés *(lire l'encadré ci-contre)*. Mais ils ont pour avantage d'agir sur tous les variants viraux. En outre, ils peuvent être pris hors de l'hôpital et sont faciles à transporter et à stocker. Et surtout, ils sont beaucoup moins chers à fabriquer. *« En revanche, comme les anticorps, ils doivent être utilisés le plus tôt possible,* souligne Bruno Lina, virologue au CHU de Lyon, *ce qui exige des moyens de détection faciles et rapides du virus dès les premiers symptômes de la maladie.* » Aussi, ils concernent avant tout les personnes à risque élevé de développer un Covid-19 sévère, à l'exception des femmes enceintes et des personnes sous dialyse. Mais ils offrent l'espoir de faire chuter les hospitalisations et les décès, notamment dans les régions du monde où l'accès aux vaccins est rendu difficile par des infrastructures sanitaires ou de transport insuffisantes.

PRISE EN CHARGE

L'éventail des approches s'élargit

Avant l'arrivée des antiviraux, le seul moyen de neutraliser directement le virus en cours d'infection était d'injecter des anticorps élaborés par génie génétique. Très coûteux, ils peuvent être donnés en binôme pour augmenter leurs chances de reconnaître d'éventuels variants comme le Ronapreve (Regeneron/Roche). Celui-ci a déjà été administré en France à plus de 2000 patients à risque élevé de développer une forme grave de Covid-19 et préventivement à plus de 3000 personnes immunodéprimées. D'autres anticorps sont en lice, dont le Regkirona (Celltrion Healthcare), le Xevudy (GSK) et le XAV-19 de la société française Xenothera.

Traitements	Patient symptomatique	Patient hospitalisé sous oxygène ou en réanimation
Antiviraux	Prescrit seulement en cas de risque élevé d'infection grave	-
Anticorps	Prescrit seulement en cas de risque élevé d'infection grave	-
Anticorps avec anti-récepteur de l'IL-6	-	Prescrit
Dexaméthasone (corticoïdes)	-	Prescrit

Selon la progression de l'infection, différents traitements sont administrés.

Les traitements permettront de soulager les hôpitaux

Surtout, au-delà de la pandémie actuelle, certains d'entre eux, tels que le molnupiravir, pourraient s'avérer utiles contre la grippe ou d'autres maladies parfois mortelles dues à des virus à ARN. Aussi, face à un tel potentiel, les États-Unis ont débloqué 3 milliards de dollars en juin 2021 pour financer un gigantesque programme de recherche et développement appelé Antiviral Program for Pandemics. Ces fonds, prélevés sur le plan de relance de l'économie de 1900 milliards de dollars porté par Joe Biden et voté par le Congrès américain en mars 2021, serviront à financer la recherche et le développement d'antiviraux oraux qui ciblent les coronavirus mais aussi d'autres virus à ARN pouvant être à l'origine de futures pandémies. Un réseau de centres de recherche fondamentale dédié sera créé. Les études cliniques ainsi que la fabrication des futurs médicaments associés vont être aussi largement subventionnées.

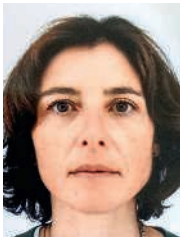
3 milliards de dollars
La subvention des États-Unis accordée à la recherche et au développement d'antiviraux oraux.

L'entrée en scène des antiviraux oraux sera un premier filet de sécurité pour la plupart des personnes présentant un risque élevé de développer une forme grave de Covid-19. *« Ils permettront, s'ils sont approuvés par l'ANSM* [Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé] *et la HAS* [Haute Autorité de santé], *de réduire l'afflux dans les hôpitaux avec la prise en charge des patients par la médecine de ville »*, ajoute Bruno Lina. Cela concernera les personnes dont le système immunitaire est défaillant, qui suivent un traitement immunosuppresseur ou ont un facteur de risque associé à leur état physique (diabète, âge élevé, obésité, problèmes pulmonaires ou cardio-vasculaires, etc.). *« Cette nouvelle forme de protection rapide pourrait s'avérer d'autant plus importante à l'avenir qu'au moins un variant du virus, le delta actuellement prédominant, peut encore infecter des personnes vaccinées et a donc des chances de persister durablement au sein de la population »*, conclut Étienne Simon-Lorière. Un avis qui prend encore plus de sens avec la nouvelle menace du variant Omicron. ■

Le traitement de la scoliose progresse enfin

Les causes de cette terrible déformation de la colonne vertébrale demeurent toujours mal connues. Des travaux de chercheurs l'expliquent par une mauvaise circulation du liquide céphalo-rachidien. Une nouvelle technique chirurgicale donne de bons résultats chez des jeunes qui n'ont pas fini leur croissance.

À Grenoble, ces deux dernières années, 30 adolescents ont bénéficié avec succès d'une nouvelle pratique chirurgicale pour traiter leur scoliose. La déformation de leur colonne vertébrale a en effet pu être corrigée durablement sans que les médecins n'aient recours à l'arthrodèse, le traitement de référence de cette affection, qui consiste en une fusion définitive des vertèbres. Ces résultats, présentés en octobre dernier à Lille, lors du congrès de la Société française de médecine de réadaptation (Sofmer), témoignent des progrès de cette approche tentée pour la première fois en 2010 aux États-Unis par le Dr Lawrence Lenke, à l'hôpital presbytérien de New York. En France, « *Grenoble et Lyon ont été les pionniers, mais des confrères à Dijon, Nice, Bordeaux et Amiens commencent à la pratiquer* », explique Marie-Christine Maximin, chirurgienne pédiatrique au CHU de Grenoble-Alpes (Isère). Elle travaille avec le Pr Aurélien Courvoisier, qui a introduit la technique en France dès 2013. Depuis, en huit ans, environ 200 jeunes en ont bénéficié.

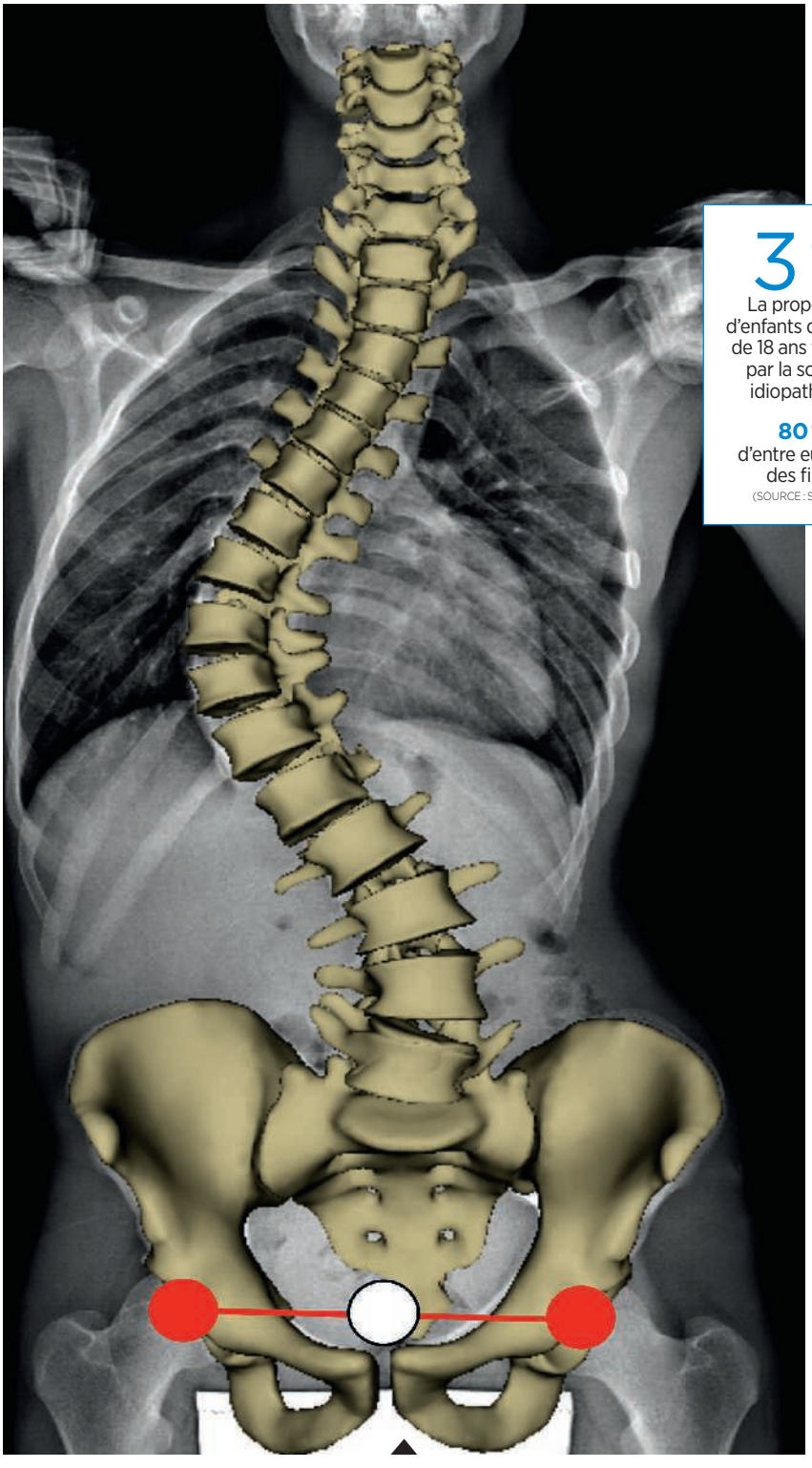


MARIE-CHRISTINE MAXIMIM

« Il est essentiel de voir l'enfant tôt, avant le début de sa croissance pubertaire, pour décider du geste »

Marie-Christine Maximim, chirurgienne pédiatrique au CHU de Grenoble-Alpes (Isère)

Cette chirurgie consiste à redresser la colonne vertébrale de l'intérieur. Le principe de la VBT (Vertebral Body Tethering) est d'introduire en premier lieu une caméra dans le thorax *via* de mini-incisions effectuées entre les côtes sur le côté du thorax (droit ou gauche selon le sens de la courbure de la scoliose). Des vis sont ensuite insérées dans les vertèbres responsables de la torsion. Elles permettent au médecin de tendre un câble de polyéthylène souple entre elles *(voir l'infographie p. 79)*. Objectif : réduire la courbure scoliotique. « *Ce geste concerne les cas de scoliose dites souples pour lesquels le traitement orthopédique traditionnel, c'est-à-dire le port permanent d'un corset* [lire l'encadré p. 79], *n'a pas donné de résultats suffisants. Il se pratique chez des jeunes qui n'ont pas fini leur croissance pubertaire et pour lesquels l'amplitude de la déformation de la colonne est importante* », précise Marie-Christine Maximin.



SPINE JOURNAL 7(2): 236-244, 2019. COURTESY CLAUDIO VERGARI, ENSAM

La radiographie permet de mettre en évidence une scoliose, déviation anormale de la colonne vertébrale qui forme une courbe sur l'un des côtés du dos (ici une reconstruction).

3 %
La proportion d'enfants de moins de 18 ans touchés par la scoliose idiopathique.

80 %
d'entre eux sont des filles.
(SOURCE : SOFCOT.)

Les effets correcteurs de la VBT, dite également chirurgie de modulation de croissance, s'observent sur un à deux ans en moyenne. Une première correction liée à la tension du câble est visible dès la sortie du bloc opératoire. Une seconde se poursuit progressivement sur plusieurs mois, selon le rythme de croissance de la colonne vertébrale. Mais pour la réussite de cette approche, *« il est essentiel de voir l'enfant tôt, avant le début de sa croissance pubertaire, pour décider du geste,* insiste Marie-Christine Maximin. *Si on opère trop tôt, la correction sera trop importante, et à l'inverse, elle sera insuffisante si l'intervention a lieu trop tard.* » Une nouvelle pratique qui permet donc d'éviter, quand il est encore temps et pour les patients les plus jeunes, la chirurgie traditionnelle, nettement plus lourde, longue et complexe, comportant également davantage de risques, notamment neurologiques et infectieux. *« En revanche, l'arthrodèse reste le traitement de référence des scolioses raides en fin de croissance »*, précise la chirurgienne.

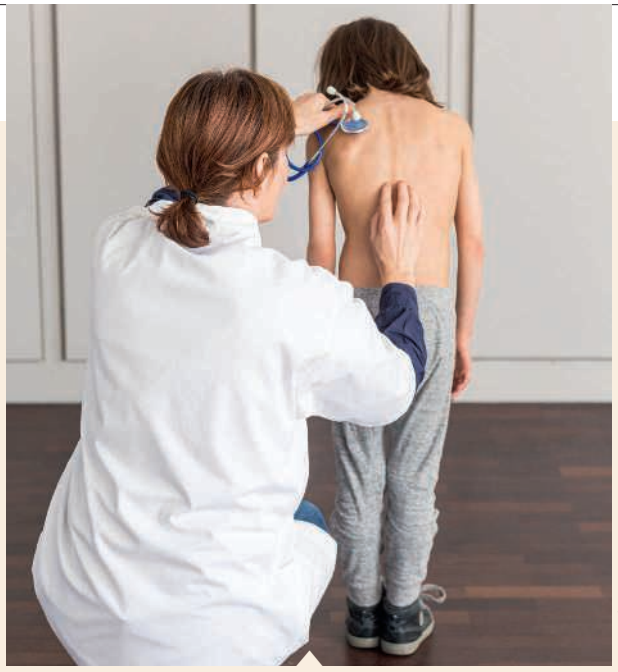
80 % des cas n'ont pas de cause connue

Ces progrès sont à saluer tant cette maladie, déjà décrite par Hippocrate (vers 460-377 avant Jésus-Christ) — le mot scoliose vient du grec *skoliôsis*, « torsion » — demeure mal comprise des médecins. Dans 80 % des cas, cette déformation tridimensionnelle de la colonne vertébrale survenant au cours de la croissance n'a pas de cause connue. On parle alors de scoliose idiopathique (SI). Les 20 % restant sont dus à des causes neurologiques, tumorales ou encore congénitales. Dans tous les cas, cette affection entraîne un lourd handicap pour les jeunes patients, contraints au port parfois permanent d'un corset. Un traitement qui peut être mal supporté, surtout au moment de l'adolescence.

DIAGNOSTIC

Mieux dépister la scoliose

C'est un paradoxe. Bien que très simple à réaliser, le dépistage de la scoliose demeure en souffrance car insuffisamment effectué. Conséquence : *« Un diagnostic tardif de formes évoluées et très déformées, parfois plus de 60°, dont la prise en charge est plus complexe et plus longue »*, déplore Jean-François Catanzariti, de la Maison de la scoliose (Villeneuve-d'Ascq, Nord). Face à cette maladie dite idiopathique dans 80 % des cas, autrement dit sans cause connue et qui n'a rien à voir avec une mauvaise posture ou le port d'un cartable trop lourd, il existe pourtant un examen très simple, le test d'Adam. En pratique, l'observateur se place derrière l'enfant debout, les jambes droites. Lorsque ce dernier se penche en plaçant ses deux mains entre les genoux, si une bosse sur un des deux côtés du dos apparaît, une consultation est nécessaire pour confirmer ou non la présence d'une scoliose. *« Outre-Rhin, un procédé technique, appelé topographie de surface ou photogrammétrie, est très utilisé,* précise le spécialiste. *Mais pas en France, où l'absence de volonté politique d'un dépistage de masse de la scoliose, pourtant dans les prérogatives de la médecine scolaire, s'ajoute à l'absence de remboursement de l'examen et au prix élevé des machines.* » Pourtant, *« dépister au plus tôt permet à la fois de déceler les formes évolutives de scoliose, d'empêcher leur aggravation et de prévenir la maladie »*, martèlent depuis plusieurs années la fondation Cotrel (1) et l'association Scoliose et Partage (2) qui s'adressent aux parents pour les sensibiliser au dépistage de leurs enfants.



© VOISIN/PHANIE

Le test d'Adam est un examen simple qui permet de déceler une bosse sur le côté du dos, caractéristique de la scoliose.

(1) www.fondationcotrel.org
(2) www.scoliose.org/silverstripe

Mais que peut-il donc bien se passer au niveau des différentes structures anatomiques concernées que sont les vertèbres, le canal vertébral et le liquide céphalo-rachidien (LCR) — produit par le cerveau et qui entoure les hémisphères cérébraux — mais aussi toute la moelle épinière le long de la colonne vertébrale ?

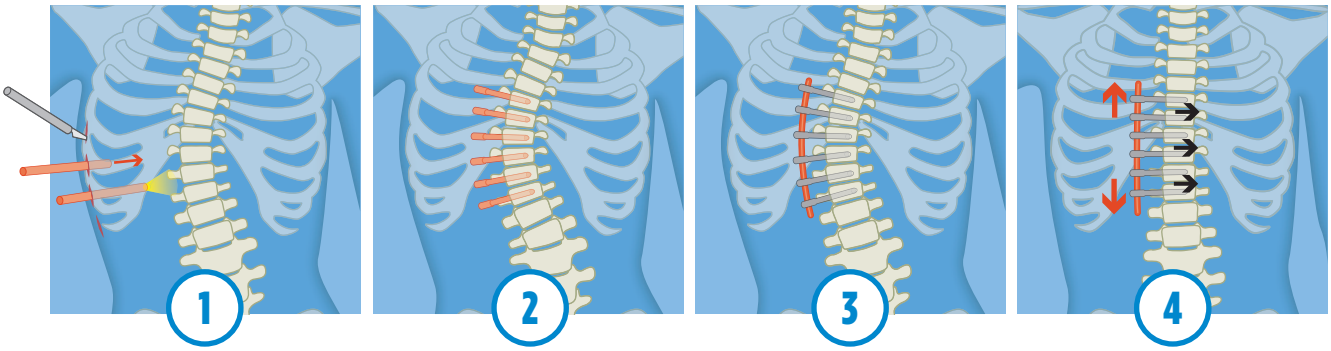
La piste du liquide céphalo-rachidien se confirme

Quels sont les facteurs déclencheurs d'une torsion parfois à l'origine de déformations osseuses graves ? Une question qui intrigue des chercheurs telle Yasmine Cantaut-Belarif de l'Institut du cerveau, à Paris. Ses récents travaux présentés au congrès de la Sofmer plaident pour l'hypothèse d'une anomalie de circulation du liquide céphalo-rachidien chez les scoliotiques. La chercheuse a démontré le rôle important chez le poisson-zèbre d'une structure appelée fibre de Reissner, présente aussi chez l'humain. Dotée de cellules ciliées, elle tapisse le canal rachidien et contrôle la géométrie de l'axe du corps en intervenant dans la manière dont circule le liquide dans le canal vertébral. Il faut savoir que ce liquide est toujours en mouvement, en partie en raison des battements du cœur mais aussi grâce aux ondulations de ces fameux cils. L'équipe parisienne est ainsi parvenue à démontrer que si les cils sont rendus dysfonctionnels, les modifications du flux du liquide céphalo-rachidien entraînent, chez l'animal, une déformation scoliotique de sa colonne vertébrale.

Jean-François Catanzariti, médecin à la Maison de la scoliose à Villeneuve-d'Ascq (Nord), teste maintenant cette hypothèse grâce au financement de la fondation Cotrel de l'Institut de France. À l'aide d'une IRM de haute performance (3 teslas), il compare la circulation du liquide céphalo-rachidien entre deux groupes, l'un constitué de 35 patients scoliotiques, l'autre d'adolescents témoins, sans aucun problème de dos. Les tout premiers résultats récemment présentés à Lille sont prometteurs. *« Ils ont révélé que dans le groupe des scoliotiques, il semble bien exister une perturbation*

LE PRINCIPE DE LA NOUVELLE CHIRURGIE

Redresser la colonne vertébrale de l'intérieur



BRUNO BOURGEOIS

1 Des petites incisions sont réalisées par le chirurgien sur le côté du thorax. Un tube est enfoncé, avec à son extrémité une caméra qui va guider le geste chirurgical.

2 Le chirurgien dispose ensuite des vis sur les vertèbres concernées par la torsion.

3 Les vis sont reliées par un câble de polyéthylène souple qui est mis en tension.

4 Les effets correcteurs s'observent sur un à deux ans en moyenne, le redressement se poursuivant selon le rythme de croissance de la colonne vertébrale du patient.

subtile de l'hydrodynamique du liquide céphalo-rachidien », s'enthousiasme Jean-François Catanzariti. Un résultat qu'il faudra confirmer avec l'analyse de l'ensemble des données.

Cette piste n'est pas la seule pour établir enfin les origines de la scoliose. D'autres travaux comme ceux d'Elazar Zelzer à l'institut Weizmann (Israël) — également soutenus par la fondation Cotrel — s'intéressent au système proprioceptif, un réseau complexe de capteurs, se répartissant de haut en bas dans notre corps. Il détecte les changements de longueur et de tension des muscles et, en réponse aux signaux reçus, ajuste la fonction musculaire. En 2020, cette équipe a démontré que des mutations d'un gène codant pour l'un de ces capteurs, Piezo 2, étaient à l'origine d'une scoliose.

Autre sujet de recherche, non moins crucial : prédire si la déformation de la colonne vertébrale des jeunes malades va s'aggraver. Aujourd'hui, les médecins ne peuvent en effet discriminer les scolioses stables de celles qui vont empirer, parfois très rapidement. Des recherches menées par l'équipe de Wafa Skalli à l'Institut de biomécanique humaine Georges-Charpak (Paris), apportent de nouveaux espoirs. « *Nous avons mis au point un indice de sévérité élaboré à partir de six critères géométriques issus de l'analyse des clichés EOS* », détaille Claudio Vergari, l'un des chercheurs en biomécanique de l'équipe. Ces images sont obtenues par un système de radiologie conventionnelle utilisant un détecteur gazeux mis au point par le physicien Georges Charpak *(lire* S. et A. *n° 698, avril 2005)*. Très peu irradiante, c'est la méthode de référence pour le suivi des scolioses de l'enfant qui nécessite des clichés fréquents. Ces nouveaux travaux très récemment publiés dans la revue *European Radiology* doivent maintenant être validés et diffusés. Ils pourraient à terme permettre d'éviter des traitements inutiles en discriminant avec précision les formes graves des stables. En attendant, les médecins sont unanimes : il faut renforcer le dépistage précoce pour repérer et prendre en charge au plus tôt les déformations. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

ORTHOPÉDIE

Un modèle numérique pour personnaliser les corsets

EMMANUELLE THIERCELIN/DIVERGENCE

Le corset rigide reste le traitement de référence de la scoliose. Pour le concevoir, le plâtre a été abandonné et grâce aux progrès majeurs réalisés ces dernières années, à partir d'un scanner du tronc de l'enfant, un moulage en 3D et en polycarbonate est désormais réalisé sur mesure *(photo ci-contre)*. En attendant le textile intelligent qui intégrera dans ses fibres une puce électronique qui, selon le degré d'étirement du tissu dépendant de la position de la colonne, communiquera au patient *via* son smartphone des informations pour corriger sa posture. C'est le projet de recherche mené par Guillaume Tartare au Gemtex (Roubaix), malheureusement en pause faute de financement.

Les volailles sont toujours de la fête

À l'heure de préparer les menus de réveillon, on peut opter pour cette viande blanche peu calorique, riche en protéines et en minéraux.

Chapon farci, dinde aux marrons, canard à l'orange… La volaille se pare de ses plus beaux atours pour sublimer les repas de fêtes de fin d'année. Grâce à leur chair moelleuse et goûteuse, poulardes et chapons — de jeunes coqs castrés dans le but d'affermir leur chair — aiguisent les papilles et se prêtent aux mets les plus raffinés. L'oie a longtemps été la volaille festive par excellence avant d'être peu à peu remplacée par la dinde — ou poule d'Inde, ramenée du Mexique en Europe par les conquistadors espagnols au XVIe siècle —, moins onéreuse et idéale pour les grandes tablées.

Une alternative à la viande rouge

Une méta-analyse montre une association entre la consommation de viande blanche et une baisse de la mortalité toutes causes confondues (1). Consommer de la volaille pourrait également réduire le risque de cancer gastrique tandis que la viande rouge ou transformée l'augmente (2). Une des hypothèses expliquant les méfaits de la viande rouge serait l'excès de fer héminique qui induirait lors de la digestion une transformation chimique des lipides conduisant à la formation d'aldéhyde, un composé néfaste pour l'ADN et les cellules (3), ce qui augmenterait le risque de cancer colorectal. Le blanc de poulet, la dinde ou le chapon en fournissent relativement peu (respectivement 0,39 mg/100 g, 1,14 mg/100 g et 1,49 mg/100 g) *a contrario* du magret de canard, qui, avec sa chair rouge, en affiche 4,8 mg pour 100 g (4). Rappelons toutefois que ce minéral, parce qu'il participe à la formation des globules rouges, est nécessaire tout au long de la vie.

28,5 kg

de volailles sont consommés par an et par habitant en France.
(SOURCE : ANVOL, INTERPROFESSION VOLAILLE DE CHAIR.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

POULARDE Jeune poule qui n'a pas encore pondu, engraissée par une nourriture riche en céréales et produits laitiers.

FER HÉMINIQUE Fer d'origine animale incorporé dans la structure de l'hème (une métalloprotéine) qui entre dans la constitution de l'hémoglobine et de la myoglobine.

ACIDES GRAS SATURÉS Acide gras saturés en hydrogène. Ils se trouvent principalement dans les graisses animales ainsi que dans les huiles de palme et de coco.

ALEXANDRA MURCIER Diététicienne nutritionniste, à Paris

Dindes et chapons ont peu d'acides gras saturés

« La volaille réunit les neuf acides aminés essentiels qui doivent être apportés par l'alimentation. Mais l'un de ses principaux atouts par rapport à la viande rouge est de fournir moins d'acides gras saturés, néfastes pour le système cardio-vasculaire. C'est notamment le cas pour la dinde et le chapon, alors que la chair de l'oie est plus grasse. Pour les fêtes, on évitera néanmoins de les cuisiner avec du beurre et on s'astreindra à consommer une seule cuillère à soupe de jus de cuisson dégraissé. »

C'est une bonne source de nutriments

La volaille apporte de bonnes quantités de potassium (414 mg/100 g de poulet rôti), de phosphore (270 mg/100 g d'oie) et de magnésium (44 mg/100 g de dinde). Elle affiche des teneurs intéressantes en cuivre (0,59 mg/100 g de caille, soit un tiers des apports nutritionnels conseillés), lequel contribue à la formation des globules rouges, à la régulation des neurotransmetteurs, et aux défenses immunitaires, à l'instar du zinc (3,75 mg/100 g de dinde) et du sélénium (9 microgrammes/100 g de canard). Elle fournit des vitamines B (13,5 mg/100 g de magret de canard), B6 (0,47 mg/100 g d'oie, soit un tiers des besoins quotidiens), ainsi que de la vitamine E (1,74 mg/100 g d'oie).

Sans la peau, les volailles sont pauvres en matières grasses

La dinde arrive en tête des volailles les moins caloriques (151 kcal/100 g). Elle affiche seulement 0,96 g/100 g d'acides gras saturés contre 3,26 g/100 g pour le chapon. La « prime au gras » revient au confit de canard (286 kcal/100 g) et à l'oie (298 kcal/100 g) qui affiche 22 g/100 g de lipides dont 6,87 g/100 g d'acides gras saturés. La volaille est aussi naturellement riche en cholestérol (85,9 mg/100 g de filet de poulet sans peau, 101 mg/100 g de dinde rôtie) indispensable à la fabrication des cellules, des hormones et de la vitamine D. Toutefois, la quantité de lipides varie selon les tissus. Par exemple, les muscles pectoraux du poulet (les blancs ou filets) sont moins riches en lipides (0,9 %) que les muscles rouges de la cuisse (2,8 %) et que la peau (26,9 % de lipides) (5).

Elles peuvent provoquer des intoxications alimentaires

Présentes naturellement dans l'intestin des volatiles, des bactéries (*Campylobacter*, salmonelles) peuvent se retrouver après abattage sur la peau de la volaille, responsables d'intoxications alimentaires qui touchent particulièrement les enfants, les personnes âgées et les immunodéprimés. L'infection est alors souvent due à une contamination croisée avec un autre aliment, une surface ou un liquide (marinade) ayant été en contact avec la peau de la volaille crue. Pour diminuer les risques, quelques précautions peuvent être prises : respecter la chaîne du froid, nettoyer à l'eau savonneuse mains, plan de travail et ustensiles de cuisine ayant servi à couper la viande crue avant de les réutiliser, décongeler la viande dans le réfrigérateur plutôt qu'à température ambiante (6).

Préférer les labellisées, source de qualité

On peut se fier aux différents labels : l'indication géographique protégée (IGP), l'appellation d'origine protégée (AOP) dont seule bénéficie la volaille de Bresse, bio AB ou le Label rouge. Ce dernier garantit par exemple la sélection de races rustiques, un élevage fermier en plein air dans de grands espaces herbeux, une alimentation composée à base de céréales (75 % minimum) et une durée d'élevage plus longue, environ le double des volailles standard élevées en cage, soit par exemple, 150 jours minimum pour un chapon et 81 jours pour un poulet. ■

Sylvie Boistard
@syboistard

(1) White Meat Consumption, All-Cause Mortality, and Cardiovascular Events: A Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies, Lupoli R. et al, *Nutrients*, 2021.

(2) Effect of Red, Processed, and White Meat Consumption on the Risk of Gastric Cancer: An Overall and Dose–Response Meta-Analysis, Kim SR. et al, *Nutrients*, 2019.

(3) The role of heme iron molecules derived from red and processed meat in the pathogenesis of colorectal carcinoma, Gamage SMK. et al, Critical Reviews *in Oncology/Hematology*, 2018.

(4) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(5) Matières grasses alimentaires et composition lipidique des volailles, Michel Lessire, Inra Productions animales, décembre 2001.

(6) Ministère de l'Agriculture, 2012.

NPL - DEA PICTURE LIBRARY/BRIDGEMAN IMAGES

Le « calendrier de Coligny » (Ier siècle) fait partie des 800 inscriptions gauloises collectées à ce jour en France.

Les écritures gauloises livrent leurs secrets

Contrairement à une idée reçue, les Gaulois utilisaient l'écriture. Un vaste programme de recherche prévoit la prochaine mise en ligne de la totalité des inscriptions gauloises recueillies à ce jour sur notre territoire. Voici un avant-goût de ce qu'il dévoilera.

Par Bernadette Arnaud @NarudaaArnaud

Ce n'était pas écrit dans le sable… Et pourtant, le cinéaste québécois Denis Villeneuve serait sans doute surpris d'apprendre que le titre de son film *Dune* (2021) inspiré du roman éponyme de science-fiction (1965), de l'écrivain Frank Herbert, était un mot d'origine gauloise ! Un nom né de *dun* ou *dunos* qui désigne les sommets, et que l'on retrouve dans *dunon* (citadelle, oppidum, colline). Latinisé en *dunum*, il a donné « dun », présent dans la toponymie d'Issoudun dans le Centre-Val de Loire — l'antique Uxellodunum (la haute forteresse) —, ou encore de Lyon, Lugdunum (la colline de Lug). Mot voyageur passé du gaulois au germanique, puis au moyen néerlandais, « dune » est ensuite revenu dans la langue française autant que dans l'anglaise.

Mais ce n'est pas tout. Au-delà des quelques centaines de mots d'origine gauloise que les linguistes traquent dans notre langue — à l'instar d'alouette, d'ambassade ou de chêne *(lire le glossaire p. 84)* —, une poignée de jeunes chercheurs se sont lancés dans le recensement de l'intégralité des inscriptions laissées par les peuples gaulois depuis plus de 2000 ans. En effet, « *à l'encontre du mythe d'une Gaule peuplée d'habitants sans écriture, les Gaulois ont laissé des centaines de documents écrits* », explique Coline Ruiz Darasse, épigraphiste, chargée de recherche CNRS à l'institut Ausonius (université Bordeaux-Montaigne). De courts textes retrouvés, parfois gravés sur pierre (une centaine d'exemplaires) ou sur des poteries, voire sur des feuilles de plomb — les éventuels textes sur peau, cire, bois, écorce ou autres matières péris-

GLOSSAIRE

Ces mots français issus du gaulois

« Le nombre de mots de la langue française issus du gaulois est difficile à estimer », selon Hugo Blanchet, chercheur à l'université Bordeaux-Montaigne. Il est vraisemblablement sous-évalué car le latin a déjà emprunté au gaulois. Et le français n'a pas le monopole de l'héritage du gaulois, le lexique gaulois étant aussi présent en franco-provençal, en occitan, en italien, en romanche, ou en catalan.

BUDGET (du gaulois *bulga*)
Le mot gaulois *bulga* « sac, bourse » est à la source des mots français « bogue » (de châtaigne) et « bouge », qui signifie originellement « sac », à partir duquel on formait le diminutif « bougette » (petit sac, bourse) que nous emprunteront les Anglais sous la forme *budget*… qui donne le français « budget ».

AMBASSADE *(ambactos)*
Attesté aussi au Moyen Âge sous la forme « ambasse » (qui a donné l'anglais *embassy*), le mot « ambassade » est un emprunt au vieil italien *ambasciata* issu du vieil occitan *ambaissada*, d'après le bas latin *ambactia* (« message »), dérivé du gaulois *ambactos* (« serviteur »).

CHEMIN *(caminos)*
Le mot « chemin » remonte au bas latin *camminus* (espagnol *camino*, etc.) d'après le gaulois *cammanos*, « chemin », dérivé d'un verbe *cang/cing* « marcher » que l'on retrouve dans le mot *cinges* (« qui marche, guerrier ») présent dans le nom de Vercingétorix !

CHÊNE *(cassanos)*
Cassanos est fréquent dans la toponymie : ainsi, Chassenon, Cassinomagos, « marché au chêne », Chasseneuil, Cassanoialon, « clairière de chênes », etc.

La restitution virtuelle en 3D (à droite) de la borne de Plumergat (Morbihan) a permis de mettre en évidence un texte gravé en dédicace aux « pères de la borne ».

sables n'ayant pas été conservés, s'ils ont jamais existé.
À la tête de cet important projet, la chercheuse coordonne la mise en ligne d'une plate-forme où sera hébergé le Recueil informatisé des inscriptions gauloises (RIIG), soit l'édition de l'ensemble des 800 inscriptions gauloises, une langue appartenant à la branche celtique continentale de l'arbre linguistique indo-européen (*lire l'encadré p. 85*), collectées à ce jour dans l'Hexagone — les frappes monétaires et leur symbolique n'entrant pas dans ce programme. Traduits et enrichis, ces écrits sont complétés par un appareillage scientifique recueilli auprès d'archéologues, historiens, linguistes et épigraphistes au cours des trente dernières années. *« Pour le monde gaulois, nous possédons bien sûr les* Commentaires de César *et d'autres textes historiques, mais grâce aux inscriptions, nous accédons directement à la pensée des habitants de la Gaule de la fin du IIIe siècle avant J.-C. au IIIe siècle après J.-C. »*, poursuit la spécialiste des langues d'attestation fragmentaire, nom savant de la discipline.

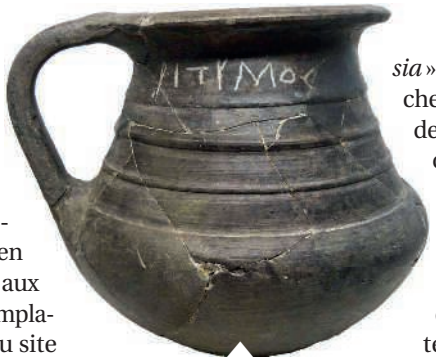
Très imaginatifs, les Gaulois ont écrit pendant cinq siècles en ayant recours dès le IIIe siècle avant J.-C. à l'alphabet des Grecs (Phocéens), présents à Marseille (Massalia) depuis 600 avant J.-C., ce qui a donné le gallo-grec (plus de 400 inscriptions collectées) ; puis, à partir du Ier siècle avant J.-C., en utilisant les lettres latines des Romains, le gallo-latin. *« Ces textes nous montrent combien les Gaulois, pour écrire leur langue, ont su s'adapter aux systèmes graphiques existants »*, ajoute Hugo Blanchet, spécialiste de linguistique ancienne et participant au projet en cours à l'université Bordeaux-Montaigne.

De nombreuses informations sur les mœurs

L'étude de l'épigraphie gauloise est un domaine qui suscite l'engouement des chercheurs, mais aussi une grande curiosité du public. D'où l'édition de ces citations antiques replacées dans leur contexte archéologique et historique à destination de tous les curieux. Avec des phrases telles que : *« Escengolati aniateios immi »* (*« J'appartiens à Eskengolatios et on ne doit pas me voler ! »*), ou

encore « *Segomaros ouilloneos touutious namausatis eiorou belesami sosin nemeton* » (« *Segomaros fils de Villonos, citoyen de Nîmes, a dédié à Belesama ce lieu sacré* »). Deux inscriptions vieilles de plus de 2000 ans !

Ces écrits antiques livrent de nombreuses informations sur la population grâce à l'anthroponymie (étude des noms de personnes) avec, par exemple, Segomaros, Martialis ou Escengolatos et sur les filiations patronymiques comme « *Untel fils de Untel* », dans un monde où n'existe pas de nom de famille et où seul est attribué celui du père ; mais aussi sur les noms de lieux avec la toponymie (à l'instar de Namausus pour Nîmes), ou encore sur les noms de divinités (théonymie) telles que Cernunnos, le dieu cornu, Belisama, la Minerve gauloise, ou Toutatis, le dieu de la tribu des Touta. La majorité des transcriptions sur pierre ont été découvertes en Narbonnaise, au sud-est de la Gaule, le long de la vallée du Rhône, à Paris, dans le Berry, le Puy-de-Dôme, ou encore dans le massif du Morvan où 40 graffites gallo-grecs ont été retrouvés sur l'oppidum de Bibracte, la capitale des Éduens (en gaulois, « le mont aux castors ») et sur l'emplacement même du site d'Alésia (Alise-Sainte-Reine), en Côte-d'Or. Ces citations sont la plupart du temps des dédicaces votives, des remerciements adressés aux divinités, ou encore des épitaphes sur des pierres tombales. « *Un certain nombre de divinités du panthéon gaulois sont également connues grâce à ces inscriptions. C'est le cas de Taranis, à Orgon; des Mères glaniques à Glanum (Saint-Rémy-de-Provence); de Belenos à Saint-Chamas* [les trois situées dans les Bouches-du-Rhône] *; ou encore du dieu forgeron Ucuetis, dont le culte était honoré à Alésia* », poursuit Hugo Blanchet. Parfois incisées sur des stèles hautes de plus de 2 mètres — consignées dans des documents du XIXe siècle aujourd'hui disparus —, ces inscriptions gauloises témoignent de l'existence d'une pratique monumentale et honorifique de l'écriture à l'image de ce que l'on rencontrait dans le reste du monde antique, en Grèce ou à Rome. Ces textes donnent ainsi une idée du multilinguisme et multigraphisme culturel avec lequel les Gaulois fonctionnaient. « *À titre d'exemple, une stèle funéraire du Ier siècle avant J.-C. trouvée à Velleron, dans le Vaucluse, et sa dédicace :* "Kaios indoutilo samolatis anektia oualete" ("Caios Indoutilo et son épouse Samolatis, fille d'Anektos, Salut !"). *Elle permet de lire le nom à*



Sur ce gobelet catalan du IIe siècle avant notre ère est inscrit en gallo-grec le nom gaulois Ritumos.

MUSÉE ZIEM, MARTIGUES

EUGENIE BACCOT/ DIVERGENCE POUR SCIENCES & AVENIR-LA RECHERCHE

COLINE RUIZ DARASSE

ÉPIGRAPHISTE, CHARGÉE DE RECHERCHE CNRS À L'INSTITUT AUSONIUS, À BORDEAUX

« Le gaulois, une langue celtique composée de plusieurs dialectes »

“La langue dite gauloise est une langue celtique continentale attestée sous sa forme écrite depuis le tout début du IIe siècle avant J.-C. et dont les dernières traces sont à dater du IVe siècle de notre ère.

Toutefois, elle était sans doute parlée bien avant sur le territoire de la Gaule, où la culture de La Tène (second âge du fer) était présente depuis le Ve siècle avant notre ère. Il est vraisemblable que les Celtes de Gaule parlaient alors déjà une forme de gaulois. Elle fait partie des langues dites d'attestation fragmentaire. Ses grandes lignes sont connues grâce aux inscriptions découvertes et aux comparaisons faites avec d'autres langues celtiques, surtout celles attestées plus tardivement (l'irlandais, le gallois et le breton). Probablement composée de plusieurs dialectes en situation « d'intercompréhension », elle semble être la même pour les inscriptions anciennes (principalement gallo-grecques) et les plus récentes (gallo-latines). Si l'étude des noms propres est bien connue pour les personnes, les lieux ou les dieux, il n'en va pas de même pour le système verbal : moins d'une dizaine de verbes sont identifiés à ce jour.”

la fois gaulois et latin du propriétaire, celui gaulois de son épouse, le salut final — Oualete —, *un mot latin, et l'ensemble de l'inscription écrite à l'aide de l'alphabet grec. Rien qu'avec cette pierre incisée nous disposons d'un témoignage d'imbrication d'identités, autant que de systèmes graphiques et de la langue parlée à ce moment-là. Un véritable instantané de l'adaptation avec laquelle fonctionnaient les Gaulois !* », s'enthousiasme Coline Ruiz Darasse. Un monde gaulois qui n'était pas une « nation » homogène, mais plutôt des dizaines de tribus complexes et confédérations (Éduens, Séquanes, etc.) dont les noms nous ont été transmis par l'élite romaine et par César au moment de la conquête, dans ses *Commentaires sur la guerre des Gaules* (Ier siècle avant J.-C.).

AKG IMAGES

Cette stèle du Ier siècle appelée « pierre de Martialis », découverte sur le site d'Alésia à Alise-Sainte-Reine (Côte-d'Or), porte une dédicace en gallo-latin.

Des formules érotiques aux tablettes vengeresses

Parmi les supports d'écrits gaulois, les graffites sur poteries communes sont les plus nombreux et témoignent d'une pratique de l'écriture par une assez grande partie de la population. *« Il s'agit souvent de très modestes titres de propriétés de type* "J'appartiens à". *Ou encore juste un nom comme celui d'Attilos, ou d'Aunisolos, titres qui constituent les trois quarts du corpus* », précise Hugo Blanchet. Comme dans toute l'Antiquité, des mentions grivoises apparaissent de temps à autre, en particulier sur des objets à boire retrouvés en contexte de banquets telles des cruches au bec verseur en forme de phallus (*bissu*, en gaulois). Mais pas seulement. Certains de ces graffites ont été identifiés sur des fusaïoles, accessoires féminins pour filer la laine, parfois porteuses de formules explicites : *« Puissé-je être chevauchée »* !

« Un autre groupe d'inscriptions sur feuilles de plomb sont les tablettes dites de défixion », poursuit l'épigraphiste. Dans le monde antique, ces inscriptions malveillantes étaient consacrées aux divinités infernales. Peu onéreux et répandu, le plomb était facile à inciser. Imprécations, mauvais sorts, pratiques magiques, tout était bon pour vouer aux gémonies le destinataire de la tablette en lui promettant une fin épouvantable. Les Gaulois les ont utilisées au même titre que de nombreux peuples de l'Antiquité. Une de ces tablettes de défixion en plomb comprenant un texte de magie en gallo-latin (Ier siècle après J.-C.), trouvée à rouvée à L'Hospitalet-du-Larzac (Aveyron), est parmi les plus célèbres. On y découvre une certaine « Severa » — « sorcière par l'écriture » — en train de convoquer des forces maléfiques. *« Ces tablettes vengeresses étaient déposées dans les tombes fraîchement creusées, car on pensait que tels des messagers, les défunts nouvellement inhumés délivraient plus rapidement ces malédictions et anathèmes aux divinités infernales qu'ils retrouvaient dans le monde souterrain* », indique Coline Ruiz Darasse. Une quinzaine de chercheurs européens collaborent actuellement à ce programme qui devrait être accessible dans son intégralité dès juin 2022. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Les Irréductibles mots gaulois dans la langue française, Jacques Lacroix, 2020.
Abécédaire illustré des mots voyageurs, Hugo Blanchet, 2021.

ANTHROPONYMIE

Astérix, Obélix… pourquoi ces -ix ?

Si les noms des Gaulois d'Astérix se terminent tous en -ix, c'est probablement en référence au plus célèbre d'entre eux, Vercingétorix (roi suprême des guerriers). Or, dans Vercingétorix, le dernier élément n'est pas -ix, mais -rix ! Il s'agit du mot signifiant « roi » en gaulois (cousin du *rex* latin, et du *rajah* indien, également d'origine indo-européenne). Par extension, l'élément celtique *-rix* (roi) a servi pour fabriquer des noms gaulois en prenant vraisemblablement le sens plus général de « puissant, riche en ». Ainsi : Eskingorix (roi des guerriers), Comartiorix (seigneur des ours), Bellorix (riche en force) ou encore Biturix (roi du monde), d'où le peuple des Bituriges dont le nom a donné celui de Bourges et du Berry.

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 88

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

PAUL ESEUX/HEMIS.FR

Dans la Tadrart rouge (Algérie), les peintures rupestres couvrent une période allant de -10 000 ans jusqu'à une époque récente et témoignent de l'évolution de la vie des populations et de la faune.

Les voies de traverse de l'humanité

« Au commencement était… » est une grande fresque qui remet en question des idées reçues sur l'histoire de l'humanité. Un regard novateur et provocateur.

DIVERSITÉ *« Je m'intéresse à l'anthropologie parce que je m'intéresse aux possibilités humaines »*, avait un jour déclaré l'anthropologue américain David Graeber. À son décès en 2020, à 59 ans, il laissait un projet monumental achevé à peine trois semaines auparavant : *The Dawn of Everything. A new history of humanity (Au commencement était. Une nouvelle histoire de l'humanité)*. Écrit en collaboration avec l'archéologue britannique David Wengrow, professeur à l'University College, à Londres (Royaume-Uni), cette somme remet en question des idées reçues sur l'histoire de l'humanité. Dans leur relecture radicale des archives historiques et archéologiques, et en multipliant les exemples, les deux spécialistes expliquent avoir vu une multitude d'histoires alternatives à celle narrant l'odyssée d'*Homo sapiens* par étapes linéaires. D'autres organisations et modèles emmenant l'humanité sur des itinéraires variés sont probables. Fruit de dix ans de travail, c'est de toutes ces autres possibilités buissonnantes et « à rebours » d'un récit traditionnel, dont rend compte ce livre. Si David Graeber se décrivait comme un anarchiste, il est considéré par nombre de ses pairs comme le *« meilleur théoricien anthropologique de sa génération »*. Sa rencontre avec David Wengrow et l'immense correspondance qu'ils ont échangée est à l'origine de ce qui, démarré comme un défi, est devenu « L'aube de tout ». Un regard novateur, souvent provocateur, sur un passé commun. ■ **Bernadette Arnaud**

Au commencement était… Une nouvelle histoire de l'humanité, David Graeber et David Wengrow, Les Liens qui Libèrent, 744 p., 29,90 €

Richesses sous-marines

PLONGÉE Depuis son départ de Concarneau en 2017, l'équipe d'Under The Pole a sillonné l'Atlantique, l'Arctique et le Pacifique à bord d'une goélette afin de documenter la vie océanique. Ce livre richement imagé revient sur ces quatre années de plongées profondes à la recherche de la fluorescence naturelle des organismes

marins en Arctique ou des coraux profonds en Polynésie française. Les textes d'Emmanuelle Périé-Bardout et de Ghislain Bardout relatent cette aventure, tandis que ceux des scientifiques qui se sont succédé à bord dévoilent des résultats inédits. ■ **S. R.**

Entre deux mondes, Ghislain Bardout, Emmanuelle Périé-Bardout, Ulmer, 256 p., 35 €

Des maladies pas si rares

ÉCLAIRAGE Avec 8000 à 9000 maladies rares recensées — touchant moins d'une personne sur 2000 chacune —, on compte environ 3 millions

de personnes atteintes en France par ces pathologies souvent difficiles à diagnostiquer. Dans cet ouvrage, le Pr Nicolas Lévy, spécialiste de génétique médicale à l'hôpital de la Timone, à Marseille, répond aux questions les plus fréquentes que se posent les patients tout en traçant des perspectives d'espoir sur leur traitement grâce aux progrès en thérapie génique et en pharmacologie. ■ **H. J.**

Les Maladies rares et les espoirs de la médecine du futur, Nicolas Lévy, Buchet Chastel, 352 p., 21 €

L'art de la cartographie céleste

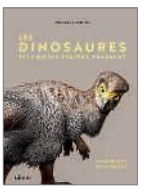
BALADE CÉLESTE Avant l'avènement des télescopes et des satellites, qui ont uniformisé la représentation du ciel, chaque culture avait développé la sienne, en rapport avec sa mythologie, son environnement… De la collection de journaux

astronomiques des Babyloniens à la première photographie d'un trou noir aux États-Unis en 2019, ce livre à l'iconographie léchée nous emmène à la découverte de ces traditions, mais aussi des grandes découvertes qui ont marqué l'histoire de l'astronomie. ■ **V. G.**

Une Histoire du ciel, Edward Brooke-Hitching, Delachaux & Niestlé, 256 p., 29,90 €

La couleur des dinosaures

PARURES Découvrez les couleurs éteintes du monde disparu des dinosaures, grâce aux travaux de Michael Benton, de l'université de Bristol (Royaume-Uni). On y croise le *Sinosauropteryx*, avec sa queue rayée de roux et de



blanc, le premier dont les motifs ont été identifiés en 2010. Ou le mélange de plumes et d'écailles du *Kulindadromeus*. Les analyses des mélanosomes — structures incluses dans la kératine des plumes — ont en effet enfin permis de calibrer les coloris d'autrefois. ■ **R. M.**

Les dinosaures tels qu'ils étaient vraiment, Michael Benton, illustrations Bob Nicholls, Ulmer, 256 p., 30 €

Les enjeux de la métrologie

SYSTÈME Ils sont historiens, physiciens, économistes ou encore philosophes. Et racontent la passionnante histoire de la métrologie, science de la mesure, depuis plus de 200 ans jusqu'aux enjeux actuels. Point de départ de leurs explications, la réforme du Système international d'unités entrée en vigueur en 2019. Quatre des sept unités de base ont été alors redéfinies à partir de constantes fondamentales de la physique : le kilogramme (masse), l'ampère (courant électrique), le kelvin (température) et la mole (quantité de matière). Grâce à cette réforme qui aura nécessité des dizaines d'années de recherches, le Système international s'affranchit *« des futures évolutions de la technique en détachant les unités d'artefacts matériels ou de procédures expérimentales »*, soulignent les auteurs en préambule, tout en rappelant *« le caractère central de la mesure dans l'organisation et le fonctionnement des sociétés humaines »*. ■ **Franck Daninos**

De La Mesure en toutes choses, Fabrice Boudjaaba (dir.), CNRS Éditions, 160 p., 18 €

L'exploration des canopées

IMMERSION Ce livre revient sur une épopée humaine et scientifique exceptionnelle : le radeau des cimes, qui permit pendant trente ans à 300 scientifiques du monde entier d'explorer des canopées forestières tropicales, en Afrique, en Amérique, en Asie et à Madagascar. La moisson scientifique est importante, rappellent les participants, dont le botaniste Francis Hallé, de l'université de Montpellier : découverte de la diversité génétique dans une même cime, des branches timides qui ne se touchent pas, des relations conflictuelles entre les lianes et les arbres porteurs, des stratégies des plantes épiphyses qui se fixent sur les plus hautes branches, des jardins de fourmis, etc. Cette aventure digne des grandes expéditions naturalistes du XIXe siècle n'est pas allée sans dissensions, incidents fâcheux ou cocasses, qui sont ici bien contés. ■

Rachel Mulot

Le Radeau des cimes, Dany Cleyet-Marrel, Gilles Ebersolt, Francis Hallé, Olivier Pascal, Actes Sud, 288 p., 36 €

Le cerveau est-il sexiste ?

CONSTRUCTION À la question de savoir si le cerveau fait la différence entre un masculin dit universel — qui s'applique à la fois aux hommes et aux femmes — et un masculin « spécifique », qui ne désigne que les hommes, la réponse des chercheurs tient en un mot : non. *« Gérant très mal l'ambiguïté, le cerveau va au plus simple et au plus fréquent et interprète donc l'usage du masculin comme s'appliquant aux personnes de sexe masculin »*, explique Pascal Gygax, l'un des auteurs, psycholinguiste à l'université de Fribourg (Suisse). Appuyant leur démonstration sur des dizaines d'études, les spécialistes concluent que ce qui n'est pas désigné dans le langage — à savoir le féminin pour indiquer les noms de métiers par exemple — n'existe pas… Une lecture revigorante à l'heure où l'entrée du pronom « iel » dans le dictionnaire *Le Robert* a fait couler beaucoup (trop) d'encre. ■

Carole Chatelain

Le Cerveau pense-t-il au masculin ? Pascal Gygax, Sandrine Zufferey et Ute Gabriel, Le Robert/Temps de parole, 176 p, 18 €

Chronique pour interne exploité

BD Saluons la parution du quatrième tome des aventures de Védécé (pour « vie de carabin », VDC), médecin et dessinateur qui décrit en BD sa vie de jeune interne. Une chronique de l'éprouvante sixième année de médecine en forme de satire à la noirceur drolatique, pleine d'ironie. Gardes interminables, conditions de travail déplorables, découverte des relations patient/médecin… Derrière l'humour ravageur de l'opus, perce le documentaire qui transpire le vécu d'un jeune médecin soumis à la pression hospitalière. ■ **H. J.**

Vie de carabin, dossiers médicaux, Védécé, Hachette, 152 p., 17,99 €

Les secrets de la Grande Pyramide

BÂTISSEURS Les papyrus de la mer Rouge sont une des plus grandes découvertes archéologiques du XX^e^ siècle. Réalisée par le Français Pierre Tallet, l'exhumation de ces « journaux » de -4600 ans a livré un pan inconnu de la vie des bâtisseurs de la Grande Pyramide. Il établit des liens entre les informations révélées par ces documents et celles relevées sur le terrain par

l'archéologue américain Mark Lehner. Cet ouvrage fait découvrir le cœur de l'État pharaonique sous Kheops, un système dont les constructions de Gizeh étaient l'épicentre. ■ **B. A.**

Les Papyrus de la mer Rouge, Pierre Tallet, Mark Lehner, Actes Sud, 320 p., 34 €

La SF aux frontières du réel

RECENSEMENT Cette anthologie fait le point sur la science-fiction en France aujourd'hui. Les réseaux sociaux et l'intelligence artificielle inspirent en particulier les auteurs qui en

pointent les dérives ou en soulignent l'absurdité avec beaucoup d'humour. Si l'ouvrage fait la part belle aux jeunes plumes, comme Émilie Querbalec, Silène Edgar ou Audrey Pleynet, il n'oublie pas les valeurs sûres comme Pierre Bordage, qui signe une passionnante dystopie où l'emploi des mots, brevetés par les géants du Web, est devenu payant pour les écrivains. Glaçant… ■ **F. N.**

Par-delà l'horizon, collectif, Éditions ActuSF, 550 p., 21,90 €

Indispensable Philip K. Dick

ANTICIPATION L'année 2022 marque les 40 ans de la disparition de Philip K. Dick, immense auteur de SF à qui l'on doit les livres devenus au cinéma *Blade Runner*, *Total Recall*… Cet abécédaire, signé

du journaliste et essayiste Ariel Kyrou, tire ici un portrait à 360° de l'écrivain visionnaire. Il démontre que la lecture de Philip K. Dick demeure essentielle, tant ses nouvelles et romans éclairent les enjeux des thèmes irriguant notre actualité, de la réalité virtuelle au réchauffement climatique. ■ **O. L.**

ABC Dick, Ariel Kyrou, Actu SF, 450 p., 19,90 €

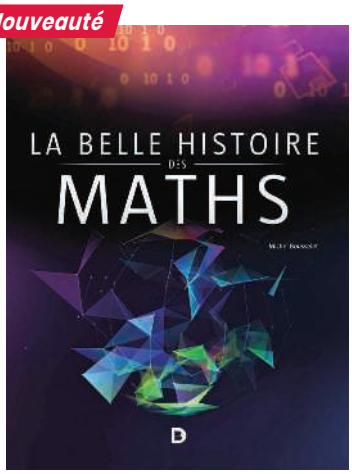
À l'épreuve du désert

TÉMOIGNAGE Le désert est *« le point où coexistent absolu et infini »* qui aimante depuis des siècles explorateurs, savants, et pèlerins mus par une quête spirituelle. William Atkins l'a éprouvé, qui a consacré trois ans de voyage et de recherche aux étendues arides d'un bout à l'autre de la planète. À commencer par la péninsule Arabique, sur les traces de grands prédécesseurs partis la traverser dans les années 1930. Que cherchait-il dans le Grand Désert de Victoria en Australie, ceux de Sonora (Mexique, États-Unis), Black Rock (États-Unis), Gobi (Chine et Mongolie) et Taklamakan (Chine) ? Dans ces lieux où résonnent aussi les récits des vies des anachorètes ? De toute évidence, à connecter la grande histoire — celle des essais nucléaires britanniques en terre aborigène ou de l'exil forcé de la minorité ouïgoure en Chine — à celle de paysages extrêmes et d'êtres humains dont le quotidien suit le cycle ardent du soleil, s'apparente à la survie et bascule vers le danger en un clignement d'yeux. ■ **Andreina De Bei**

Dans l'Infinité des déserts. Voyages aux quatre coins du monde, William Atkins, Albin Michel, 480 p., 22,90 €

Offrez des beaux livres !

Nouveauté



La belle histoire des maths

Michel Rousselet

2021 | 368 pages, relié, illustré | 9782807331402 | **31,90 €**

L'incroyable richesse des mathématiques et de ses applications à travers un tour d'horizon chronologique et largement illustré des grandes étapes qui ont marqué son évolution.

La belle histoire des révolutions numériques

Henri Lilen

2019 | 384 pages, relié, illustré | 9782807324787 | **29,00 €**

Une histoire de l'électronique, de l'informatique, d'internet, de la robotique et de l'intelligence artificielle à travers un tour d'horizon chronologique et largement illustré des grandes étapes qui ont marqué leur évolution.

Nouveauté

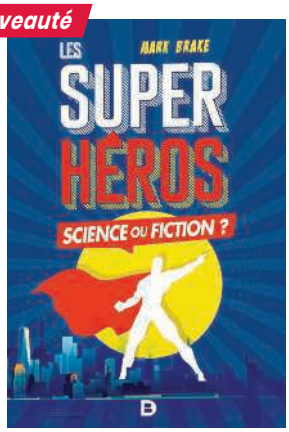
Petit manuel de potions pour sorciers débutants

Jean Espérance

2021 | 112 pages, relié, illustré | 9782807338937 | **16,90 €**

Si vous avez toujours rêvé d'intégrer une école de sorcellerie sans jamais avoir pu en franchir les portes, ce livre est pour vous. Plongez au cœur du monde magique des potions. Car ne vous y trompez pas, la magie existe bel et bien dans notre monde. Nous lui avons simplement donné un autre nom : la chimie.

Nouveauté



Super-héros, Science ou fiction ?

Mark Brak

Octobre 2021 | 288 pages | 9782807331457 | **18,90 €**

Superman, Iron Man, Captain America, Aquaman, Spiderman ... Découvrez ce qui se cache derrière les pouvoirs des super héros. Pourrait-on fabriquer l'armure d'Iron Man? Comment fonctionne le marteau de Thor ? Plus de cinquante questions de sciences ludiques et instructives sur le monde de vos super-héros préférés.

EXPOSITIONS

Chambéry (73)

Risque, osez l'expo !
On se confronte au risque à tous les niveaux, dans la vie privée ou professionnelle, en famille ou en sciences, dans la petite enfance, au moment d'apprendre à marcher, ou à l'adolescence, période clef des comportements dangereux. Cette exposition augmentée de jeux et de cafés-débats aborde toutes les dimensions de cette notion.
Galerie Eurêka, carré Curial, 150, rue de la République, jusqu'au 26 février. Rens. : 04.79.60.04.25.

Issy-les-Moulineaux (92)

IA, qui es-tu ?
Lieu de création autour du numérique, le Cube propose une expérience interactive de 30 minutes (également disponible sur son site Internet) qui interroge les relations entre humains et intelligence artificielle. Le visiteur échange avec un chatbot, Ada, dans le cadre d'un scénario futuriste où il est question de participer à un programme « d'amortalité numérique ».
Le Cube, 20, cours Saint-Vincent, jusqu'en 2099. Rens. : 01.58.88.30.00.

Lewarde (59)

Trésors insolites
Objets et documents techniques de l'activité minière sont rassemblés sur le site de cet ancien puits de mine devenu musée. Ils permettent de comprendre avec quelle expertise les mines se sont déployées dans la région, comment le charbon a pu être extrait et avec quels instruments et outils.
Centre historique minier Fosse Delloye, rue d'Erchin, jusqu'au 30 avril. Rens. : 03.27.95.82.82.

Lyon (69)

Sur la piste des Sioux
Tipis, plumes, bison, calumet de la paix… Ces attributs sont principalement liés aux Indiens des Grandes Plaines, en particulier aux Sioux lakotas. L'exposition du musée des Confluences explore cette représentation, qui a fini par englober à tort tout l'imaginaire lié aux Indiens d'Amérique, et en montre aussi l'évolution. (Lire notre reportage en ligne : sciav.fr/899sioux)
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 28 août. Rens. : 04.28.38.12.12.

Marseille (13)

VIH/sida, l'épidémie n'est pas finie !
Le nom de cette exposition est en réalité un slogan de l'association Act Up. Car outre le volet médical, elle traite de ses dimensions sociales, politiques, associatives, et montre l'étendue des mobilisations engendrées par l'épidémie de sida. L'impact des traitements et l'accès aux médicaments restent néanmoins le cœur du sujet.
Mucem, 1, esplanade J4, jusqu'au 2 mai. Rens. : 04.84.35.13.13.

Paris (75)

Aux frontières de l'humain
À la croisée de la biologie, de la technologie et de la philosophie, cette exposition ambitieuse aborde le fantasme humain qui consiste à vouloir dépasser ses limites. Y compris celle de sa mortalité. Entre humain augmenté et bébé génétiquement modifié choisis sur catalogue, l'horizon des possibles s'élargit à nombre d'interrogations. (Lire notre reportage : sciav.fr/899humain)
Musée de l'Homme, 17, place du Trocadéro, jusqu'au 30 mai. Rens. : 01.44.05.72.72.

Sciences Expériences
Ouvert en octobre 2021, ce lieu parisien dédié à la science se présente comme un parcours immersif, entre pédagogie et divertissement. On y explore les grands fonds marins, les immensités de l'Univers, le centre de la Terre ou le corps humain, et le visiteur se familiarisera avec le laser ou la lévitation.
Sciences Expériences, 23, rue des Pirogues-de-Bercy. Rens. : 01.88.40.63.40.

Carnet d'inventions
L'illustrateur Lapin a déambulé dans le musée des Arts et Métiers et ses réserves entre mai et juillet 2021 pour un reportage dessiné. Une soixantaine d'aquarelles sont exposées sur place. On y retrouve les phonographes, l'aéroplane de 1897 de Clément Ader ainsi que des portraits de membres de l'équipe du musée.
Musée des Arts et Métiers, 60, rue Réaumur, jusqu'au 8 mai. Rens. : 01.53.01.82.63.

Musée /Saint-Nazaire (44)

Le sous-marin « Espadon »

L'*Espadon* a fait peau neuve ! Ce sous-marin de la classe Narval, mis en service en 1960, a sillonné le fond des océans durant 25 ans avant de finir sa carrière à Saint-Nazaire, où il se visite depuis 1987. Pas moins de 2,7 millions de curieux ont sillonné ses coursives, au prix d'une usure du bâtiment. Après une campagne de restauration de quatre mois début 2021, l'*Espadon* a rouvert ses écoutilles au public, avec un parcours de visite complètement revu. Équipés d'un casque audioguide, les apprentis sous-mariniers sont invités à partager le quotidien de l'équipage lors d'une mission effectuée en mai 1964 au-delà du cercle polaire arctique. Depuis la salle des moteurs électriques jusqu'à celle des torpilles, le commentaire déroule le récit de la mission et les conditions de vie, spartiates, des 65 marins logés dans le bâtiment de 77,8 m de long, sur 7,8 m de large… Les plus jeunes (à partir de 7 ans) disposent de leur propre canal qui les glisse dans la peau de Jean, *alias* « Le bidou », surnom donné au plus jeune membre d'équipage. ■ **Fabrice Nicot**

MAELWENN LEDUC

Le parcours de la visite permet au visiteur de partager le quotidien de l'équipage lors d'une mission effectuée en 1964.

Écluse fortifiée, avenue de la Forme-écluse. Rens. : 02.28.54.06.40.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

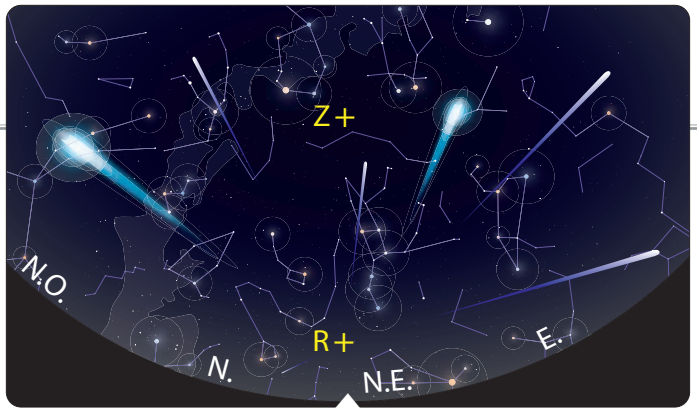
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La plus petite planète du Système solaire atteint sa plus grande distance angulaire (19°) à l'est du Soleil le 7 et sera en conjonction inférieure le 23. Elle est visible en soirée en première quinzaine, très basse vers le couchant.

VÉNUS L'étincelante étoile du Berger passe en conjonction inférieure le 9 et devient observable le matin dès la seconde quinzaine du mois et ce, jusqu'à la fin de l'été. D'abord très proche de la direction du Soleil, elle s'en éloigne ensuite rapidement et se lève, à titre d'exemple, près de 2 h 15 avant lui le 31.

MARS Encore peu brillante, la planète Rouge peine à se dégager des lueurs de l'aube. En fin de mois, elle se trouve à une dizaine de degrés à l'ouest de Vénus, ce qui constitue un bon moyen pour la repérer.

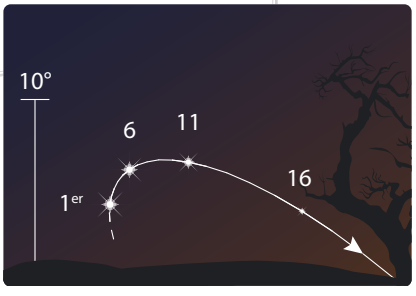


Aspect du ciel durant la nuit du 3 au 4, vers 1 h du matin. Z désigne le zénith et R le point dont les étoiles filantes semblent provenir : le radiant.

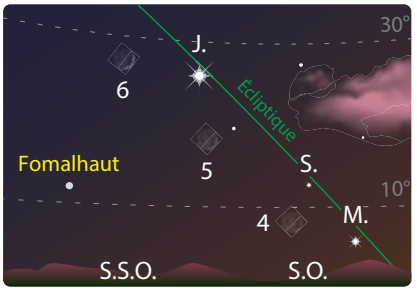
La pluie d'étoiles filantes des Quadrantides

DANS LA NUIT SANS LUNE DU 3 AU 4, loin des lumières des villes, vous pourriez admirer jusqu'à une centaine de météores par heure. Lorsque cette pluie d'étoiles filantes fut étudiée scientifiquement au XIXe siècle, son radiant était situé dans une constellation aujourd'hui disparue, le Quadrant mural… d'où elle tire son nom : les Quadrantides.

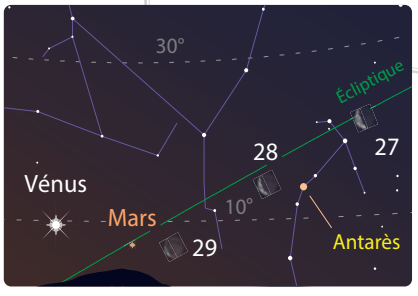
Notre conseil Aucun instrument d'optique n'est nécessaire pour observer des étoiles filantes : tout ce dont vous aurez besoin, c'est d'une chaise longue confortable, de vêtements chauds… et de patience !



DURANT LES DEUX PREMIÈRES SEMAINES DE JANVIER EN SOIRÉE, il est possible d'observer Mercure vers le couchant. La scène est représentée 45 minutes après le coucher du Soleil.



DURANT LES SOIRÉES DU 4 AU 6, notre satellite la Lune, alors en fin premier croissant, rend visite aux planètes Mercure (M.), Saturne (S.) et Jupiter (J.) vers le couchant.



LE MATIN DU 29, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, observez le rapprochement entre le dernier croissant de Lune et les planètes Mars et Vénus, très bas vers le levant.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de janvier

JUPITER La plus grande des planètes est visible en soirée et en début de nuit vers l'ouest mais se couche de plus en plus tôt. On la localise encore facilement en raison de son éclat important mais le mois prochain, elle disparaîtra dans le crépuscule.

SATURNE La planète aux anneaux n'est plus du tout dans de bonnes conditions d'observation. Elle est visible en soirée en début de mois vers le couchant. Elle passera en conjonction avec le Soleil le 4 février.

L'appli du mois

SUNCALC est une application gratuite en anglais fonctionnant sous Android. Très simple d'utilisation, elle fournit la hauteur et l'azimut du Soleil en fonction du lieu et de la date de votre choix (numériquement et graphiquement) ainsi que ses heures de lever, de coucher et de culmination.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Abandonner toutes les énergies fossiles

La combustion d'énergies fossiles — charbon, pétrole et gaz naturel — représente approximativement 80 % des émissions de CO_2 mondiales. Les émissions fugitives (fuites, torchères, etc.) lors de leur extraction et de leur transport constituent environ 30 % des émissions anthropiques de méthane. Notre usage des énergies fossiles est, de loin, la première cause du changement climatique qui affecte aujourd'hui toutes les régions du monde. C'est connu, affirmé depuis longtemps. Et pourtant ! Le Pacte climatique de Glasgow, conclu lors de la COP26 en novembre dernier, est le premier accord international sur le climat qui contient les mots « énergies fossiles ». Historique ? oui assurément, mais cette mention intervient tard, très tard et dans des termes bien timides et insuffisants, *« appelant »* seulement les pays à *« accélérer les efforts en vue de diminuer la production d'électricité à partir de centrales à charbon sans capture de CO_2 et de supprimer progressivement les subventions inefficaces en faveur des combustibles fossiles »*. L'analyse des trajectoires qui permettent de contenir l'augmentation de la température autour de 1,5 °C est claire : le retard pris est tel que ces trajectoires n'impliquent pas des efforts mais une diminution concrète, immédiate et rapide de l'extraction de toutes les énergies fossiles, pour utiliser d'ici à 2030 environ 3 fois moins de charbon, et atteindre une baisse de plus de 30 % pour le pétrole et le gaz. Et si 2022 était l'année de rupture où, enfin, la sortie des énergies fossiles était amorcée ? Chiche ? ■

CAMILLE CIER/HANS LUCAS

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

MATHS PAR SYLVIE BENZONI

L'ordinateur permet de vérifier les preuves mathématiques

À quoi sert un ordinateur pour une mathématicienne ? À communiquer et à s'informer, comme pour tout le monde. À écrire des articles, cours et livres, avec un logiciel conçu pour les mathématiques et leurs innombrables symboles. L'ordinateur sert aussi à faire des « simulations numériques », à résoudre de manière approchée les équations qu'on ne sait pas résoudre à la main — les premiers calculateurs électroniques furent mis au point pour cela au milieu du XXe siècle. Il permet de guider l'intuition, de tester par le calcul des conjectures, c'est-à-dire des affirmations qu'on pense vraies mais qu'on ne sait pas démontrer. Le nombre de tests possibles étant fini, l'ordinateur ne remplace pas le travail de la mathématicienne, contrairement à ce qu'affirmait Claude Allègre alors ministre de l'Éducation. Car la preuve est essentielle en mathématiques, et la preuve dans un nombre de cas aussi grand soit-il ne suffit pas. Par exemple l'une des plus célèbres conjectures, appelée hypothèse de Riemann, a été vérifiée sur dix mille milliards de cas mais n'est pas démontrée. Dans les mathématiques contemporaines, les démonstrations prennent souvent des centaines de pages. Comment certifier qu'elles sont correctes ? Un nouvel usage de l'ordinateur se développe avec les « assistants de preuve », qui doivent d'abord être nourris des mathématiques connues. Toute une communauté y travaille. ■

BRUNO LÉVY

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Du bon usage du « éthique by design »

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Le Mythe de la singularité. Faut-il craindre l'intelligence artificielle ?* Le Seuil, 2017.

On entend de plus en plus souvent l'expression « éthique by design » dans le secteur des industries du numérique. Pourquoi conserver une locution anglaise dans une expression française ? Pris littéralement, la formule se transpose en « éthique par conception » ou en « éthique dès la conception ». Et, il en va ainsi lorsqu'on développe des outils logiciels, car on doit songer à l'éthique dès les premières ébauches, qu'il s'agisse de la finalité, qu'il faut peser au regard des besoins et des contraintes des différents acteurs, ou de l'architecture informatique, qui doit dissuader, voire interdire quand c'est possible, des utilisations oublieuses de la morale. Ainsi préfèrera-t-on un traitement local à une centralisation des données personnelles, pour éviter leur piratage ; si ce n'est pas possible, on les rendra anonymes ; à défaut, on sécurisera les accès aux bases de données et on exigera le recueil du consentement éclairé des utilisateurs. Dans un registre symétrique, on s'assurera qu'une personne assume toujours la responsabilité d'une décision prise avec le concours d'un ordinateur. Cette « garantie humaine » présuppose une compréhension claire des recommandations des machines, et donc des explications pour en interpréter la signification, ce qui influe sur la conception des systèmes informatiques. Mais, en anglais, « by design » veut d'abord dire « délibérément », « de façon consciente et préméditée », ce qui s'oppose à l'inattendu et à l'incertain. En cela, l'éthique by design résulte d'une volonté opiniâtre de penser l'action, sa légitimité et ses conséquences, de toujours donner satisfaction, de ne rien abandonner au hasard, de ne pas laisser aller les choses telles qu'elles sont sans intervenir. À cette fin, on doit tester en situation les dispositifs et s'assurer de leur robustesse pour éviter les accidents. Bref, l'usage du vocable « by design » ne tient ici ni à une paresse à traduire, ni à une ignorance des ressources de la langue française ni à une affectation, mais à une ambivalence délicate à rendre. ■

L'ŒIL DE LASCAR

La Russie a admis le 16 novembre dernier avoir pulvérisé un de ses satellites en orbite au cours d'un tir d'essai lancé depuis la Terre. Une action *« déstabilisatrice »* pour la Nasa, dont le directeur s'est dit *« scandalisé »* par cette opération. Le nuage de débris a mis en danger la Station spatiale internationale : ses sept membres d'équipage ont dû temporairement s'abriter dans les vaisseaux Soyouz et SpaceX accrochés à la carlingue du laboratoire spatial. Moscou a jugé ces déclarations *« hypocrites »*, les États-Unis ayant eux-mêmes pratiqué dans le passé ces tirs anti-satellitaires. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Pourquoi les larmes sont-elles salées ?

Sylvain G.

La composition d'une larme peut varier selon certains facteurs, notamment si cette dernière est produite sur le coup de l'émotion. Dans ce cas, elle comprend des hormones. Mais dans l'ensemble, ses constituants sont toujours les mêmes : protéines, fer, potassium, calcium, urée et… chlorure de sodium, présent dans le sel de table. D'où leur goût salé. À noter qu'une étude chez 40 oiseaux et 25 reptiles, publiée en 2020, a révélé que si la composition des larmes varie selon le milieu dans lequel évoluent les animaux, toutes comportent une part importante de chlorure de sodium et de fer. Autrement dit, toutes sont salées. ■ **A.-S. T.**

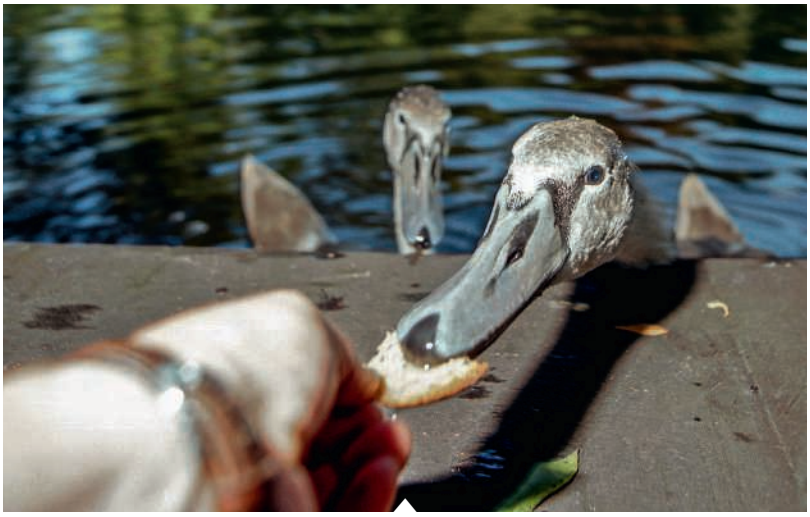
ASTRONOMIE

Que se passera-t-il quand la Voie lactée croisera la galaxie d'Andromède ?

Saras S.

D'ici à 4 milliards d'années, se produira une gigantesque fusion. La galaxie d'Andromède est en effet sur une trajectoire de collision avec la Voie lactée. Les deux galaxies foncent l'une vers l'autre et vont se heurter de front. De cette rencontre naîtront des centaines de millions de nouvelles étoiles et une énorme galaxie ovoïde résultant de la fusion. Les distances entre les étoiles sont tellement grandes dans les galaxies qu'il n'y a pas vraiment de risque de collision entre les étoiles provenant des deux galaxies. Le Soleil devrait ainsi survivre à cet événement, qui s'étalera sur des millions d'années. ■

J. I. @IgnasseJ



ULF PHILIPOWSKI/PLAINPICTURE

Nourrir les canards avec du pain peut entraîner des troubles digestifs.

ORNITHOLOGIE

Peut-on sans risque donner du pain aux oiseaux ?

Mallaury S.

Offrir aux oiseaux, canards et cygnes les restes de pain rassis conservés à la maison fait partie des classiques des promenades familiales dans la nature. Pourtant, le message de la Ligue pour la protection des oiseaux est on ne peut plus clair : *« Ne donnez pas de pain aux cygnes et aux canards, cela génère des maladies et peut même les tuer. »* Pourquoi ? Parce que l'organisme de ces oiseaux herbivores n'est pas adapté à sa consommation, laquelle est la cause de nombreux problèmes de santé. En premier lieu, l'ingestion de pain entraîne des troubles digestifs chez les canards et les cygnes, qui ne digèrent pas le gluten. L'aliment se gonfle et colle dans leur estomac. Consommé en grande quantité, il conduit par ailleurs à du surpoids, ce qui peut empêcher les animaux de s'enfuir devant un danger. Mais ce n'est pas tout. Comme le pain rassasie rapidement les oiseaux, sa consommation va réduire la diversification de leur alimentation. Avec des carences en vitamines et en minéraux à la clé, susceptibles de conduire à des malformations osseuses : le bout des ailes se recourbe et les oiseaux ne peuvent plus voler normalement. Le pain est également déconseillé si l'on veut venir en aide aux oiseaux durant les périodes de grand froid. Il faut lui préférer un mélange de graines composé de tournesol noir, de cacahuètes et de maïs concassé, des pains de graisse végétale, ou des graines de tournesol, cacahuètes, amandes, noix, noisettes non grillées et non salées. ■

Anne-Sophie Tassart @TassartAS

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 898, décembre 2021

Il faut avouer que les inventeurs des arts mécaniques ont été bien plus utiles aux hommes que les inventeurs de syllogismes

Chaque mot dont le nombre de lettres est premier voit sa dernière lettre colorée en rouge.

AZOTE BAVEUX CAQUE DUO FRÉJUSIEN OKOUMÉ PLOUC WHIG

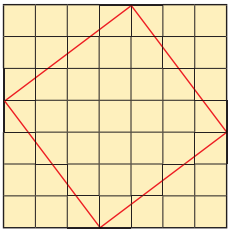
On peut remarquer que dans cet ensemble de mots, les vingt consonnes sont toutes représentées, chacune une fois et une seule.

Complet latin

		11	10	15	11	17	14	22	20
		3	17	16	16	10	10	7	8
11	4			6	5			3	1
	31		1	2	6	3	8	4	7
17	18	4	6	7		8	3	5	2
10	13	7	3			6	1	2	4
5	16			1	4		2	8	6
	16		7	3	2	4			
27	3	1	2	8	7	5	4		3
	36	2	8	4	3	1	6	7	5

Un carré inscrit

En situant les sommets d'un carré à 4 et 3, on a immédiatement par le théorème de Pythagore un carré dont l'hypoténuse est de longueur 5.



Chiffres en compétition

Le champion est 9 car il obtient 100 en ne s'utilisant que 4 fois :
99 + 9/9 = 100
Il est suivi de près par 1 qui s'utilise 5 fois :
111 - 11 = 100 ; de même pour 3.

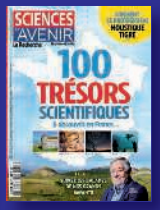
Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 890
Microbiotes

N° 891
Découvrir les confins de l'Univers

N° 892
Vaccins contre le cancer



N° 893/894
100 trésors scientifiques

N° 895
Explorer l'espace

N° 896
Les super pouvoirs du cerveau

N° 897
Tempêtes, chaleur extrême, inondations

N° 898
Découverte d'un continent englouti

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45 av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 890 ❑ N° 891 ❑ N° 892 ❑ N° 893/894
❑ N° 895 ❑ N° 896 ❑ N° 897 ❑ N° 898

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

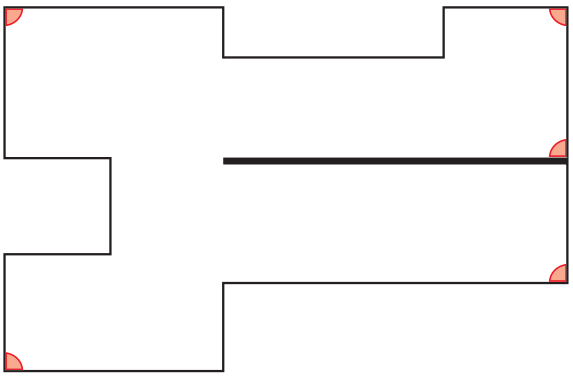
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Caméras casées

Cette bijouterie est actuellement sécurisée par cinq caméras, qui couvrent chacune un angle de 90°, placées dans des endroits stratégiques sur ce plan. Mais à bien y regarder, ne pourrait-on pas se contenter de moins de caméras ?



Reliefs chiffrés

Dans cette grille, chaque case a une altitude notée de 1 à 8. Dans chaque ligne et chaque colonne, les altitudes sont toutes différentes.
Les cases bleues (creux) sont d'altitude moindre que toutes les cases voisines (droite-gauche et haut-bas) ; de même, les cases roses (pics) ont une altitude supérieure à leurs voisines (droite-gauche et haut-bas). Les voisinages en diagonale ne comptent pas. Les cases blanches voisinent soit avec des roses plus hautes, soit des bleues plus basses.
Retrouvez l'altitude de chaque case.

	2				8		
	7						3
4					6		
							1
	6						
				2			
		3					

« Le varan, seul saurien qui se résumerait »

Le philosophe allemand Friedrich Nietzsche (1844-1900) n'a ni prononcé ni écrit cette phrase mais il en a utilisé les lettres. Il s'agit en effet d'une anagramme d'une de ses célèbres citations, à un accent près. Saurez-vous retrouver laquelle ?

Logique de style

Malgré les apparences, les lettres de ce paragraphe n'ont pas été colorées par l'écrivain français Raymond Queneau (1903-1976) pour illustrer ses *Exercices de style*, mais pour suivre une certaine logique. Pour que cette logique soit complète, il faudrait colorer une lettre supplémentaire. Laquelle ?

L'autobus était bondé. L'homme au galurin à la ganse violette descendit à Saint-Lazare. Un vieux militaire bouscula un autre passager pour mieux voir au-dehors.

Dites l'an avec des 13

Trois 13, combinés arithmétiquement avec les 4 opérations, peuvent former aussi bien 14 que 39 :

13 + 13 + 13 = 39

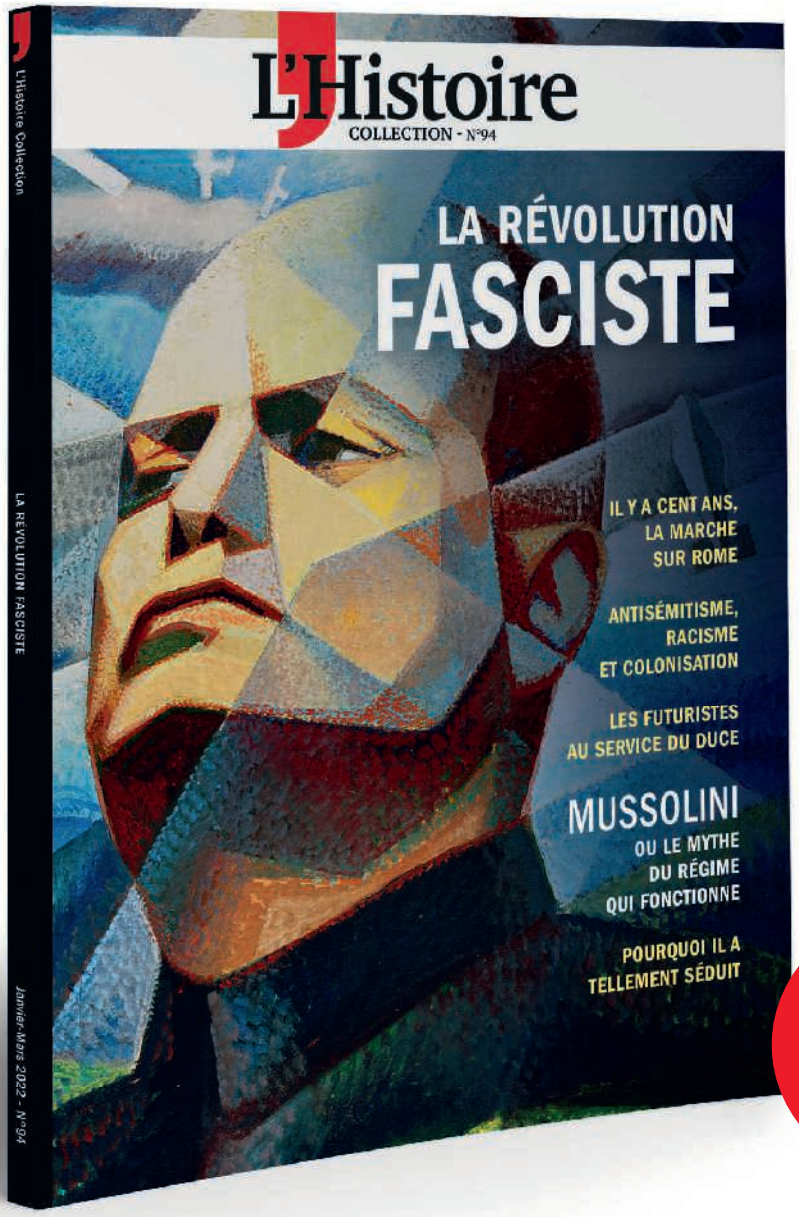
13 / 13 + 13 = 14

Combien de 13 vous faudra-t-il pour obtenir la nouvelle année 2022 ?

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LE NOUVEAU
magazine-livre
des passionnés
d'histoire

Trimestriel
132 pages



Chez votre marchand
de journaux
et chez
votre libraire

« Fascisme » : le mot, galvaudé, a fini par désigner toutes sortes de régimes. Mais quelle est la vraie nature de ce mouvement né en Italie il y a tout juste cent ans ? Que doit-il à la personnalité de son chef, Mussolini ? Pourquoi a-t-il tellement séduit ? Les historiens s'accordent, aujourd'hui, pour en faire le premier totalitarisme.

L'Histoire
COLLECTION

Jusqu'à 35 % d'économies sur vos factures d'énergie.
Travaux, aides, conseils : Hellio s'occupe de tous vos projets de rénovation !

Votre énergie a de l'impact

hellio

Pompe à chaleur
à partir de 2 000 €
~~au lieu de 11 000€~~

Demandez votre visite technique
100 % gratuite et sans engagement sur

particulier.hellio.com

Ou appelez le **01 87 66 61 93**